



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Departamento de Electrónica, Tecnología de  
Computadoras y Proyectos

Tesis Doctoral

Métodos para la comparación de alternativas  
mediante un Sistema de Ayuda a la Decisión  
(S.A.D.) y “Soft Computing”

M<sup>a</sup> del Socorro García Cascales

Directora: M<sup>a</sup> Teresa Lamata Jiménez (UGR)

Tutor UPCT: Ramón Ruiz Merino

Cartagena 2009



## RESUMEN

El proceso de resolución de problemas que supone la acción de proyectar está dividido en dos partes esenciales: El problema creativo que plantea la necesidad de buscar soluciones y el problema de evaluación y toma de decisión que plantea la necesidad de escoger de entre todas las soluciones generadas, la óptima o la que mejor satisfaga los objetivos.

En muchas situaciones, los seres humanos han de tomar decisiones. Las personas que tienen que asumir la responsabilidad de tomar decisiones difíciles cuyas consecuencias influirán en el proyecto o en la organización a la que pertenecen o dirigen, están sometidas a tensiones profesionales y emocionales. Estas decisiones difíciles se caracterizan por observar intereses contrapuestos, tener elementos de incertidumbre, envolver distintas personas en la decisión o bien poseer elementos difícilmente valorables.

Desde que en 1965 Lofti Zadeh introdujera el concepto de lo “fuzzy” permitiendo la pertenencia de un elemento a un conjunto de forma gradual, y no de manera absoluta como establece la teoría conjuntista clásica, es decir, admitiendo pertenencias valoradas en el intervalo  $[0,1]$  en lugar de en el conjunto  $\{0,1\}$ . Las aplicaciones y desarrollos basados en este sencillo concepto han evolucionado de tal modo que, hoy en día, es prácticamente imposible calcular el volumen de negocio que generan en todo el mundo.

En este contexto, el objetivo general de la presente investigación es ahondar en el estudio de la evaluación de alternativas en el ámbito de la “Soft Computing” y dado que los métodos clásicos resultan ineficientes para problemas de decisión complejos, sobre todo para aquellos casos en los que nos encontremos con criterios de los que solo disponemos de información cualitativa. En este trabajo se presenta un sistema híbrido que recoge las fortalezas de cada una de las métodos clásicos utilizados. Con este propósito se pretende aportar una herramienta de ámbito general mediante un sistema de ayuda a la decisión (SAD) para la evaluación de alternativas de manera que ayude a modelizar distintos tipos de problemas, como podrían ser la evaluación de alternativas en la selección de personal, en la selección de proyectos, etc.

Y en particular como ejemplo de aplicación de la investigación aportada se presenta el desarrollo de un SAD para el modelado del problema del ranking de universidades tomando el ámbito de la Ingeniería Industrial.

## ABSTRACT

The process of solving problems that making a project supposes is divided into two essential parts: the creative problem which poses the need to find solutions, and the problem of evaluation and decision making which implies the need to choose from all the solutions generated, the optimum option, or that which best satisfies the objectives.

In many situations, human beings must make decisions. Those people who must accept the responsibility of taking difficult decisions with consequences that will influence the project or the organization they belong to or manage, are subjected to professional and emotional stresses. These difficult decisions are characterised by observing opposing interests having elements of uncertainty, involving different people in the decision or possessing elements which are difficult to value.

Since 1965 when Lofti Zadeh introduced the “fuzzy” concept which permitted an element to belong to a set in a gradual way, and not in an absolute way as classical set theory established, that is to say, admitting belonging valued in the interval  $[0,1]$  instead of in the set  $\{0,1\}$ , the applications and developments based on this simple concept have evolved to such an extent that nowadays, it is practically impossible to calculate the volume of business it generates throughout the world.

In this context, the general objective of the present investigation is to go deeper into the study of the evaluation of alternatives in the field of “Soft Computing”, given that the classical methods are inefficient for complex decision problems, above all for those cases in which we find ourselves with criteria about which we only have qualitative information. In this work a hybrid system is presented which gathers together the strengths of each of the classical methods used. With this purpose the intention is to provide a general tool by means of a decision support system (DSS) for the evaluation of alternatives in such a way that it helps to modelize different types of problems, such as the evaluation of alternatives in the selection of personnel, in the selection of projects, etc.

In particular, as an example of the application of the investigation carried out, the development of a DSS is presented for the modelling of the problem of ranking universities, using the field of Industrial Engineering.

## AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de esta tesis doctoral ha sido un largo camino en el que he tenido muchos compañeros de viaje a los que no puedo olvidar y debo agradecer el desarrollo de este trabajo.

En primer lugar mi agradecimiento a Ramón Ruiz que ha sido mi tutor por parte de la UPCT y la persona que me puso “en el buen camino” desde el punto de vista científico, sirviendo de enlace con el director del Grupo de Investigación Modelos de Decisión y Optimización (MODO), el profesor José Luís Verdegay (Curro) el cual me acogió en el grupo de manera incondicional y prestándome todas las facilidades que he podido necesitar.

Al grupo de investigación MODO del Departamento de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial de la Universidad de Granada, los cuales me acogieron no solo como una compañera sino también como una amiga.

Mi agradecimiento más especial es para M<sup>a</sup> Teresa Lamata (Maite) que no solo ha sido mi directora de Tesis, nuestra relación ha llegado mucho más allá de la dirección de este trabajo, ha sido mi maestra, mi amiga, mi consejera y mi guía científica y que espero siga siendo durante mucho tiempo.

No puedo olvidar a Antonio García Arias (Papá) y todo su apoyo gráfico e incondicional. Y a Francisco Escribá (Paco) que sin su ayuda en programación no hubiera podido culminar este trabajo.

Finalmente a mi familia y el más importante Eduardo Ruiz (Edu), mi amor, que me ha aportado la energía, la confianza y el ánimo que a mi me han faltado en muchos momentos de este largo camino. Y tampoco me puedo olvidar de mis niñas (Cristina y Carmen) que son el motor de mi vida.

Gracias a todos, por que cada uno en su medida, habéis hecho posible la culminación de este trabajo y lo que ha supuesto para mi, a nivel científico y personal.

Resumen .....	i
Abstract.....	ii
Agradecimientos .....	iii
Índice .....	iv
Lista de figuras .....	ix
Lista de tablas .....	xiv

## BLOQUE I. INTRODUCCIÓN

### CAPITULO I.1. INTRODUCCIÓN

I.1.1. INTRODUCCIÓN.....	3
I.1.2. EL CONTEXTO DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
I.1.3. LOS OBJETIVOS DE LA TESIS.....	4
I.1.4. EL ALCANCE DE LA TESIS.....	5
I.1.5. LA ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	5

### CAPITULO I.2. LA TOMA DE DECISIONES

I.2.1. INTRODUCCIÓN.....	9
I.2.2. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE DECISIÓN .....	11
<i>I.2.2.1. DECISOR/A O UNIDAD DECISORA .....</i>	<i>11</i>
<i>I.2.2.2. ANALISTA.....</i>	<i>11</i>
<i>I.2.2.3. AMBIENTE O CONTEXTO DE LA SITUACIÓN</i> <i>DE DECISIÓN.....</i>	<i>11</i>
<i>I.2.2.4. CRITERIOS: OBJETIVOS, ATRIBUTOS Y METAS.....</i>	<i>12</i>
<i>I.2.2.5. PESOS .....</i>	<i>12</i>
<i>I.2.2.6. ALTERNATIVAS O DECISIONES POSIBLES .....</i>	<i>13</i>
<i>I.2.2.7. MATRIZ DE VALORACIÓN.....</i>	<i>13</i>
<i>I.2.2.8. SOLUCION EFICIENTE.....</i>	<i>14</i>
I.2.3. CLASIFICACIÓN DE LOS PROBLEMAS DE DECISIÓN .....	14

I.2.3.1. ATENDIENDO A LAS SITUACIONES DE DECISIONES.....	14
I.2.3.2. ATENDIENDO AL ESTADO DEL ENTORNO.....	14
I.2.3.3. ATENDIENDO A LA NATURALEZA DE LAS ALTERNATIVAS.....	15
I.2.3.4. ATENDIENDO A LAS CARACTERÍSTICAS DE LA UNIDAD DECISORA.....	15
<b>I.2.4. FASES DE UN PROCESO DE TOMA DE DECISIÓN</b>	
<b>MULTICRITERIO.....</b>	<b>15</b>
I.2.4.1. ESTRUCTURACIÓN DEL PROBLEMA DE DECISION.....	15
I.2.4.2. ANÁLISIS DEL PROBLEMA DE DECISIÓN.....	16
I.2.4.3. IMPLEMENTACIÓN DE LA DECISIÓN.....	16
I.2.4.4. EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	16
<b>I.2.5. PRINCIPALES MÉTODOS DE DECISIÓN MULTICRITERIO</b>	
<b>DISCRETOS.....</b>	<b>17</b>
I.2.5.1. REFERENCIAS HISTÓRICAS SOBRE LA DECISIÓN MULTICRITERIO.....	17
I.2.5.2. LA ESCUELA AMERICANA.....	19
I.2.5.2. LA ESCUELA EUROPEA.....	21
I.2.5.3. OTROS MÉTODOS DE DECISIÓN MULTICRITERIO.....	22
<b>CAPITULO I.3. SISTEMAS DE AYUDA A LA DECISIÓN (SAD)</b>	
<b>I.3.1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>27</b>
<b>I.3.2. PRESENTACIÓN Y TAXONOMÍA DE LOS PROBLEMAS DE     DECISIÓN.....</b>	<b>29</b>
<b>I.3.3. CONTEXTOS PARA DISEÑAR SAD.....</b>	<b>33</b>
<b>I.3.4. SISTEMAS DE GESTIÓN DE BASE DE DATOS (SGBD).....</b>	<b>36</b>
<b>I.3.5. SISTEMAS DE GESTIÓN DE BASE DE MODELOS (SGBM).....</b>	<b>37</b>
<b>I.3.6. SISTEMAS DE GESTIÓN Y DE GENERACIÓN DE DIALOGOS     (SGGD).....</b>	<b>38</b>
<b>I.3.7. DISEÑO Y EVALUACIÓN DE SAD.....</b>	<b>39</b>
<b>I.3.8. CLASIFICACIÓN DE LOS SAD.....</b>	<b>39</b>

BLOQUE II METODOLOGÍA

**CAPITULO II.1. SOFT COMPUTING. MODELADO LINGÜÍSTICO DIFUSO**

**II.1.1. INTRODUCCIÓN ..... 43**

**II.1.2. SOFT COMPUTING ..... 43**

*II.1.2.1.LÓGICA DIFUSA ..... 46*

**II.1.3. ORDENACIÓN DE NÚMEROS DIFUSOS..... 55**

*II.1.3.1.REVISION DE LA LITERATURA..... 55*

*II.1.3.2.MÉTODOS DE ORDENACIÓN SEGÚN BÓRTOLAN  
Y DEGANI..... 57*

*II.1.3.3. MÉTODOS DE ORDENACIÓN SEGÚN CHEN Y HWANG .. 60*

*II.1.3.4. MÉTODOS DE ORDENACIÓN SEGÚN WANG Y KERRE .. 66*

*II.1.3.5. PROCESO DE ORDENACIÓN DE LIOU Y WANG ..... 68*

*II.1.3.6. PROCESO DE ORDENACIÓN DE GARCIA-CASCALES  
Y LAMATA ..... 71*

*II.1.3.7. CONCLUSIONES ..... 76*

**II.1.3. MODELADO LINGÜÍSTICO DIFUSO ..... 77**

*II.1.3.1. ELECCIÓN DEL CONJUNTO DE TÉRMINOS  
LINGÜÍSTICOS..... 79*

*II.1.3.2. SEMÁNTICA DEL CONJUNTO DE TÉRMINOS  
LINGÜÍSTICOS ..... 80*

**II.1.4 RESUMEN..... 82**

**CAPITULO II.2. VALORACIÓN DE ALTERNATIVAS**

**II.2.1. INTRODUCCIÓN ..... 83**

**II.2.2. EL PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (AHP) ..... 83**

*II.2.2.1. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES..... 84*

*II.2.2.2. AXIOMAS BÁSICOS ..... 85*

*II.2.2.3. METODOLOGÍA DEL PROCESO ANALÍTICO  
JERARQUICO ..... 85*

*II.2.2.4. AHP EN GRUPO..... 97*

II.2.2.5. VENTAJAS E INCONVENIENTES DEL AHP .....	97
II.2.2.6. REVISIÓN DE LA LITERATURA DEL AHP.....	98
II.2.2.7. AHP DIFUSO.....	102
<b>II.2.3. METODO TOPSIS</b>	
II.2.3.1. EL CONCEPTO DE ALTERNATIVA IDEAL .....	102
II.2.3.2. EL MÉTODO TOPSIS .....	103
II.2.3.3. ALGORITMO CLÁSICO DEL MÉTODO TOPSIS.....	104
II.2.3.4. PROBLEMAS QUE SE PLANTEAN EN EL MÉTODO TOPSIS.....	106
II.2.3.4. NUEVA APROXIMACIÓN AL MÉTODO TOPSIS.....	109
II.2.3.5. EL MÉTODO TOPSIS DIFUSO MODIFICADO .....	115
II.2.3.6. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	119
<b>II.2.4. RESUMEN.....</b>	<b>119</b>
 BLOQUE III SISTEMA DE AYUDA A LA DECISIÓN PARA EL RANKING DE UNIVERSIDADES EN EL ÁMBITO DE LA INGENIERÍA INDUSTRIAL	
<b>CAPITULO III.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	
III.1.1. PROGRAMA DE EVALUACIÓN INSTITUCIONAL (PEI) .....	123
III.1.2. OBJETIVOS DEL SAD.....	127
 <b>CAPITULO III.2. BASE DE DATOS</b>	
III.2.1. INTRODUCCIÓN.....	131
III.2.2. BASE DE DATOS IEE .....	132
III.2.3. ENCUESTA ENVIADA A EXPERTOS.....	136
III.2.3.1. PRIMERA FASE DE LA ENCUESTA .....	137
III.2.3.1. SEGUNDA FASE DE LA ENCUESTA.....	143
III.2.4. BASE DE DATOS A PARTIR DE LA ENCUESTA .....	144
 <b>CAPITULO III.3. AGREGACIÓN DE INFORMACIÓN</b>	
III.3.1. INTRODUCCIÓN.....	145
III.3.2. CONSTRUCCIÓN DE LAS MATRICES PARA CADA EXPERTO....	145
III.3.2.1. MODELO TEÓRICO DE OBTENCIÓN DE DATOS .....	146

## VIII INDICE

III.2.4.2. <i>MODELO PRÁCTICO</i> .....	148
<b>III.3.3. DEFINICIÓN DE LOS CONJUNTOS DIFUSOS PARA LAS ETIQUETAS SEMICUANTITATIVAS</b> .....	<b>149</b>
III.3.3.1. <i>DISTRIBUCIÓN NORMAL</i> .....	151
III.3.3.2. <i>ETIQUETAS EI(EVIDENCIAS INSUFICIENTES)</i> .....	153
<b>III.3.4. PONDERACIÓN DE CRITERIOS Y SUBCRITERIOS</b> .....	<b>153</b>
III.3.4.1. <i>PROCESO PRIMARIO</i> .....	154
III.3.4.2. <i>PROCESO SECUNDARIO</i> .....	155
<b>CAPITULO III.4. SADRU-II</b>	
III.4.1. <b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>163</b>
III.4.2. <b>DESCRPCIÓN DEL SOFTWARE SADRU-II</b> .....	<b>163</b>
III.4.3. <b>DESARROLLO DE UN CASO</b> .....	<b>170</b>
III.4.3.1. <i>MÉTODO TOPSIS CLÁSICO</i> .....	171
III.4.3.2. <i>MÉTODO TOPSIS MODIFICADO</i> .....	177
<b>BLOQUE IV CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS</b>	
<b>CAPITULO IV.1. CONCLUSIONES</b>	
IV.1.1. <b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>187</b>
IV.1.2. <b>CONCLUSIONES CORRESPONDIENTES AL ESTADO DEL ARTE</b>	<b>187</b>
IV.1.3. <b>CONCLUSIONES CORRESPONDIENTES A LAS APORTACIONES METODOLÓGICAS</b> .....	<b>188</b>
IV.1.4. <b>CONCLUSIONES CORRESPONDIENTES A LA APLICACIÓN DE LA TESIS</b> .....	<b>190</b>
<b>CAPITULO IV.2 TRABAJOS FUTUROS</b>	
IV.2.1. <b>RECOMENDACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES</b> .....	<b>193</b>
IV.2.2. <b>FUTURAS INVESTIGACIONES EN LAS APORTACIONES METODOLÓGICAS</b> .....	<b>193</b>
IV.2.3. <b>FUTURAS INVESTIGACIONES EN LAS APLICACIONES</b> .....	<b>194</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>199</b>

## LISTADO DE FIGURAS

- Figura I.1. Esquema del contexto de la investigación
- Figura I.2. Esquema de desarrollo de la presente tesis doctoral
- Figura I.3. Representación de las fases de un proceso de decisión multicriterio
- Figura I.4. Relaciones entre decisiones
- Figura I.5. Niveles de decisión
- Figura I.6. Componentes del SAD
- Figura I.7. Niveles de diseño del SAD
- Figura I.8. Ingeniería de Sistemas
- Figura II.1. Ejemplo de función de pertenencia de un conjunto difuso
- Figura II.2. Variables lingüísticas de la edad con tres conjuntos difusos, y el grado de pertenencia para una cierta edad  $p$
- Figura II.3. Representación gráfica de las funciones de pertenencia triangular, trapezoidal y gaussiana
- Figura II.4. Ejemplo de números difusos
- Figura II.5. Representación de un número difuso triangular con sus tres puntos fundamentales  $(a,b,c)$
- Figura II.6. Clasificación de los métodos de ordenación de números difusos según Bortolan y Degani
- Figura II.7. Clasificación de los métodos de ordenación de números difusos según Chen y Hwang
- Figura II.8. Clasificación de los métodos de ordenación de números difusos según Wang y Kerre
- Figura II.9. Representación de los números difusos  $A$  y  $B$
- Figura II.10. Representación de la etiqueta “algo más que alrededor de 3”

Figura II.11. Representación de la etiqueta “algo menos que alrededor de 4”

Figura II.12. Representación de  $S_L(A_i)$ ,  $S_M(A_i)$  y  $S_R(A_i)$

Figura II.13. Representación de cuatro números difusos

Figura II.14. Ejemplo de variable lingüística

Figura II.15. Definición de la semántica de la variable lingüística *altura* usando funciones de pertenencia trapezoidales

Figura II.16. Definición semántica de la variable lingüística *altura* usando funciones de pertenencia triangulares

Figura II.17. Distribuciones diferentes del concepto *excelente*

Figura II.18. Esquema de valoración de alternativas

Figura II.19. Diagrama de flujo del proceso analítico jerárquico AHP

Figura II.20. Jerarquía en AHP

Figura II.21. Ilustración de distancias al ideal y al anti-ideal

Figura II.22. Pasos del Método TOPSIS

Figura II.23. Conceptos PIS y NIS

Figura II.24. Modo relativo

Figura II.25. Modo absoluto

Figura III.1. Fases del PEI

Figura III.2. Criterios, subcriterios e indicadores del PEI

Figura III.3. Estructura del SAD

Figura III.4. Estructura de la base de datos

Figura III.5. Formulario raíz de entrada de datos a la Base de Datos

Figura III.6. Formulario correspondiente a la base de datos de los Informes de Evaluación Externa IEE de la ANECA

Figura III.7. Ejemplo de introducción manual de los formularios de IEE

Figura III.8. Ejemplo de relación de universidades-titulaciones introducidas en la base de datos

Figura III.9: Carátula de la encuesta enviada a expertos

Figura III.10: Preguntas sobre los criterios principales

Figura III.11.: Ejemplo de preguntas (1,2,3)

Figura III.12.: Ejemplo de preguntas (4,5,6)

Figura III.13.: Ejemplo de preguntas (7,8,9)

Figura III.14.: Ejemplo de preguntas (10,11,12)

Figura III.15.: Ejemplo de preguntas (13,14,15)

Figura III.16.: Ejemplo de preguntas (16,17,18)

Figura III.17.: Ejemplo de preguntas (19,20,21)

Figura III.18.: Ejemplo de la pregunta de la segunda parte del cuestionario

Figura III.19: Formulario de importación de los datos de las encuestas de los expertos

Figura III.20: Ejemplo información experto 1 para preguntas (1,2,3)

Figura III.21: Representación de las etiquetas lingüísticas para  $t=1$

Figura III.22: Representación de las etiquetas lingüísticas para  $t=2$

Figura III.23: Representación de las etiquetas lingüísticas para  $t=3$

Figura III.24: Gráfica de una distribución normal y significado del área bajo la curva

Figura III.25: Inicio del Software

Figura III.26: Paso 0. Selección de Universidades Titulaciones a estudio

Figura III.27: Establecer matriz de decisión

Figura III.28: Paso 2 Normalización

Figura III.29: Paso 2. Ponderación

Figura III.30: Paso 4 Calculo de  $A^+$  y  $A^-$

## XII LISTADO DE FIGURAS

Figura III.31: Paso 5 Calculo de  $d^+$  y  $d^-$

Figura III.32: Paso 6 Calculo  $R$

Figura III.33: Paso 7 Defuzzificación

Figura III.34: Paso 8 Ranking

Figura III.35: Generación de la Matriz de decisión

Figura III.36: Normalización correspondiente a TOPSIS clásico.

Figura III.37: Ponderación correspondiente a TOPSIS clásico.

Figura III.38: Valores  $A^+$  y  $A^-$  en el método TOPSIS clásico

Figura III.39: Valores  $d^+$  y  $d^-$  en el método TOPSIS clásico

Figura III.40: Valores de  $R$  en el método TOPSIS clásico

Figura III.41: Resultados defuzzificados correspondiente al algoritmo TOPSIS clásico.

Figura III.42: Ranking para el criterio 1 Programa Formativo correspondiente al algoritmo TOPSIS clásico

Figura III.43: Ranking para el criterio 2. Organización de la enseñanza correspondiente al algoritmo TOPSIS clásico

Figura III.44: Ranking para el criterio 3 Recursos Humanos correspondiente al algoritmo TOPSIS clásico

Figura III.45: Ranking para el criterio 4 Recursos materiales correspondiente al algoritmo TOPSIS clásico

Figura III.46: Ranking para el criterio 5 Proceso Formativo correspondiente al algoritmo TOPSIS clásico

Figura III.47: Ranking para el criterio 6 Resultados correspondiente al algoritmo TOPSIS clásico

Figura III.48: Ranking para el Total correspondiente al algoritmo TOPSIS clásico

Figura III.49: Normalización correspondiente a TOPSIS modificado.

Figura III.50: Ponderación correspondiente a TOPSIS modificado.

Figura III.51: Valores  $A^+$  y  $A^-$  en el método TOPSIS modificado

Figura III.52: Valores  $d^+$  y  $d^-$  en el método TOPSIS modificado

Figura III.53: Valores de  $R$  en el método TOPSIS modificado

Figura III.54: Resultados defuzzificados correspondiente al algoritmo TOPSIS modificado.

Figura III.55: Ranking para el criterio 1 Programa Formativo correspondiente al algoritmo TOPSIS modificado

Figura III.56: Ranking para el criterio 2. Organización de la enseñanza correspondiente al algoritmo TOPSIS modificado

Figura III.57: Ranking para el criterio 3 Recursos Humanos correspondiente al algoritmo TOPSIS modificado

Figura III.58: Ranking para el criterio 4 Recursos materiales correspondiente al algoritmo TOPSIS modificado

Figura III.59: Ranking para el criterio 5 Proceso Formativo correspondiente al algoritmo TOPSIS modificado

Figura III.60: Ranking para el criterio 6 Resultados correspondiente al algoritmo TOPSIS modificado

Figura III.61: Ranking para el Total correspondiente al algoritmo TOPSIS modificado

## LISTADO DE TABLAS

- Tabla I.1. Matriz de valoración
- Tabla II.1. Comparativa entre métodos de ordenación
- Tabla II.2. Pares de valores  $(a, b)$  asociados con  $\beta$  y  $(1 - \beta)$  para calcular  $I_{\beta, \lambda}(A_i)$  para cualquier  $\beta \neq 0$
- Tabla II.3. Rango de valores  $[a, b]$  asociados con  $\beta$  y  $\lambda$  para cada alternativa  $I_{\beta, \lambda}(A_i)$
- Tabla II.4. Propuestas de escalas de asignación directa
- Tabla II.5. Escala fundamental de comparación pareada
- Tabla II.6. Índice de consistencia aleatorio (RI) en función de la dimensión de la matriz (n)
- Tabla II.7. Matriz de valoración
- Tabla II.8. Revisión bibliográfica del AHP
- Tabla II.9. Matriz de decisión
- Tabla II.10. Algoritmo TOPSIS para el ejemplo a estudio
- Tabla II.11. Algoritmo TOPSIS para el ejemplo a estudio al que se ha añadido una nueva alternativa
- Tabla II.12. Métodos de normalización
- Tabla II.13. Algoritmo TOPSIS para el ejemplo de estudio con la modificación de la norma
- Tabla II.14. Algoritmo TOPSIS para el ejemplo a estudio con modificación de la norma y con la inclusión de una nueva alternativa
- Tabla II.15. Algoritmo TOPSIS para el ejemplo a estudio con modificación de la norma e inclusión de alternativas ficticias
- Tabla II.16. Algoritmo TOPSIS para el ejemplo a estudio con modificación de la norma e inclusión de alternativas ficticias y la inclusión de una nueva alternativa
- Tabla II.17. Comparación de métodos TOPSIS difusos
- Tabla II.18. Matriz de decisión

- Tabla II.19. Aplicaciones del método TOPSIS difuso en la literatura
- Tabla III.1. Relación de Universidades participantes en el Libro Blanco de las Titulaciones de Ingeniería Rama Industrial
- Tabla III.2. Relación de titulaciones participantes en el Libro Blanco de las Titulaciones de Ingeniería Rama Industrial
- Tabla III.3. Informes publicados por la ANECA
- Tabla III.4. Tabla de comparaciones necesarias por niveles
- Tabla III.5. Tabla de preguntas del cuestionario
- Tabla III.6. Escala de conversión difusa triangular
- Tabla III.7. Definición de etiquetas lingüísticas
- Tabla III.8. Ponderación de los criterios y subcriterios como proceso primario de decisión
- Tabla III.9. Ponderación de los criterios y subcriterios como proceso secundario de decisión mediante agregación por media aritmética
- Tabla III.10. Ponderación de los criterios y subcriterios como proceso secundario de decisión mediante agregación por media geométrica
- Tabla III.11. Resumen de los resultados



## ***BLOQUE I. INTRODUCCIÓN***



# CAPÍTULO I.1

## Introducción

---

### I.1.1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este capítulo es servir de introducción a esta tesis. Durante su desarrollo se expondrá el contexto, alcance, objetivos y estructura de la presente investigación.

- El contexto constará de una descripción del marco en el que se desarrolla el propósito de la tesis doctoral, de modo que sirva para entender por que se ha planteado este tema como avance en el conocimiento.
- En el apartado referente al alcance se definirán los límites del objeto de la investigación, separando los aspectos que quedan dentro del estudio de aquellos que se relegan a posteriores trabajos.
- En lo referente a los objetivos, se especificarán aquellos de carácter general que se pretendan alcanzar a lo largo de la tesis
- Finalmente, se describe la estructura y contenido del trabajo, que ayudará a situar al lector a lo largo del desarrollo de la exposición.

### I.1.2. EL CONTEXTO DE LA INVESTIGACIÓN

El turbulento entorno socio-económico en que actualmente se encuentran las empresas, motivado por la fuerte globalización de los mercados la rápida aceleración del cambio tecnológico, lleva a éstas a la necesidad de operar en forma de organizaciones más ágiles y flexibles que le permitan trabajar de manera más competitiva para sus clientes e innovar mediante el desarrollo o mejora de procesos.

En proyectos de ingeniería la toma de decisión es una actividad intelectual esencial, que forma parte de la fase creativa del proyecto, sin la cual este no puede progresar. Durante el desarrollo de un proyecto se toman decisiones complejas; esta complejidad viene marcada por el entorno de incertidumbre en el que se desarrollan, como es la trascendencia que muchas de estas decisiones tienen para el proyecto, debido a las responsabilidades que ello implica para los

proyectistas o directores de proyecto, por los agentes implicados o afectados por la decisión adoptada y por los diferentes criterios o puntos de vista que hay que tener en cuenta y que a menudo están en conflicto.

Las organizaciones industriales necesitan desarrollar mejores métodos y herramientas para evaluar la actuación de sus proyectos o alternativas. En este contexto nos movemos dentro de esta tesis.

El contexto de esta investigación puede sintetizarse mediante la figura I.1.

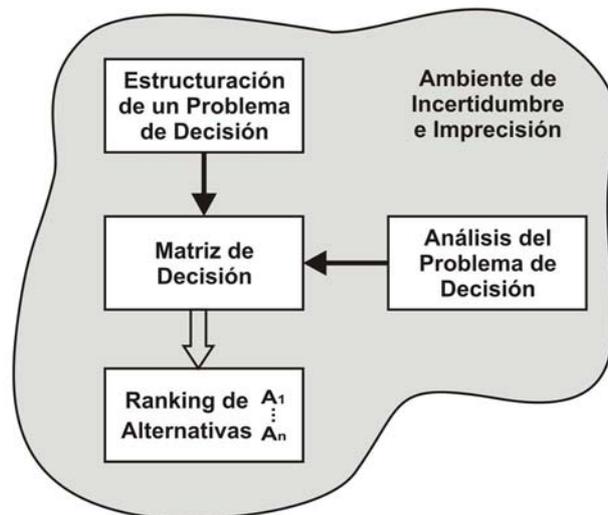


Figura I.1.: Esquema del contexto de la investigación

Siguiendo el esquema de la figura I.1., la necesidad de esta investigación se articula en torno a cuatro factores:

- La estructuración de los problemas de decisión, con el establecimiento final de la matriz de decisión que será objeto de estudio.
- El análisis del problema de decisión mediante la aplicación de metodologías de decisión.
- El ambiente donde se desarrollan los problemas de decisión, que como hemos comentado cada vez son más complejos y cambiantes, lo que nos hace movernos en el campo de la incertidumbre e imprecisión.
- Finalmente, la ordenación final de las alternativas o proyectos que serán objeto de estudio.

### I.1.3. LOS OBJETIVOS DE LA TESIS

En este contexto, el objetivo general de la presente investigación es ahondar en el estudio de la toma de decisión en el campo de la evaluación de alternativas en un entorno incierto y en concreto en el ámbito de la “Soft Computing”.

Con este propósito se pretende aportar una herramienta general para la evaluación de alternativas de manera que ayude a modelizar distintos tipos de

problemas. Como podrían ser la evaluación de alternativas en procesos de selección de personal, en procesos de selección de contratistas en obra, en problemas de localización industrial, en el estudio de ofertas de proyectos para concursos públicos, en gestión de proyectos, en cartera de proyectos, etc.

Y en particular otro objetivo de la tesis es el desarrollo de un Sistema de Ayuda a la Decisión (SAD) para el modelado un problema concreto como es el caso de los ranking de universidades en el ámbito de la ingeniería industrial.

#### **I.1.4. EL ALCANCE DE LA TESIS**

En primer lugar, debe volverse a resaltar que la presente tesis se centra esencialmente sobre la cuestión de la toma de decisión. Por consiguiente, no entra dentro del alcance de esta investigación el estudio de otros aspectos relacionados con la calidad universitaria. Si embargo, dichos elementos serán abordados tangencialmente, en la medida en que interaccionen con la cuestión aquí tratada. Por otro lado, tampoco se pretende hacer una aportación específica a la teoría general de la toma de decisión, sino más bien articular una propuesta con una marcada orientación práctica, sin perjuicio, como es lógico, del pretendido rigor científico.

Por tanto, el alcance de la investigación se centra en la toma de decisión en el ámbito de la Soft Computing para la comparación de alternativas. Si bien se extenderá el estudio al desarrollo de un SAD en el ranking de universidades del campo de la ingeniería industrial. El objetivo de esta aplicación es esencialmente mostrar la potencialidad de la propuesta y abrir las puertas a posteriores investigaciones.

#### **I.1.5. LA ESTRUCTURA DE LA TESIS**

La tesis está estructura en once capítulos los cuales están agrupados en cuatro bloques, ordenados según un proceso lógico de desarrollo en función de los objetivos de la investigación. En la figura I.2. se recoge el flujo del planteamiento desarrollado.

Como puede observarse en la citada figura, el flujo de desarrollo se plantea a partir de un estado del conocimiento, en el que se analiza el tratamiento del problema de la toma de decisión, y en concreto la fase de evaluación de alternativas y los Sistemas de Ayuda a la Decisión.

Posteriormente se plantea la aportación en sí de la tesis doctoral, un sistema integrado de evaluación y ranking de alternativas en el ámbito de la “Soft Computing”.

Una vez presentada la aportación, se acometerá el estudio de su aplicabilidad a un problema de ranking como es el bien conocido, ranking de universidades, mediante el desarrollo de un SAD, “ad hoc”, al problema objeto de estudio. SAD que integra las aportaciones metodológicas desarrolladas en la presente tesis doctoral.

Finalmente, tal como se observa en la Figura I.2. se presentan las principales conclusiones y trabajos futuros del trabajo desarrollado

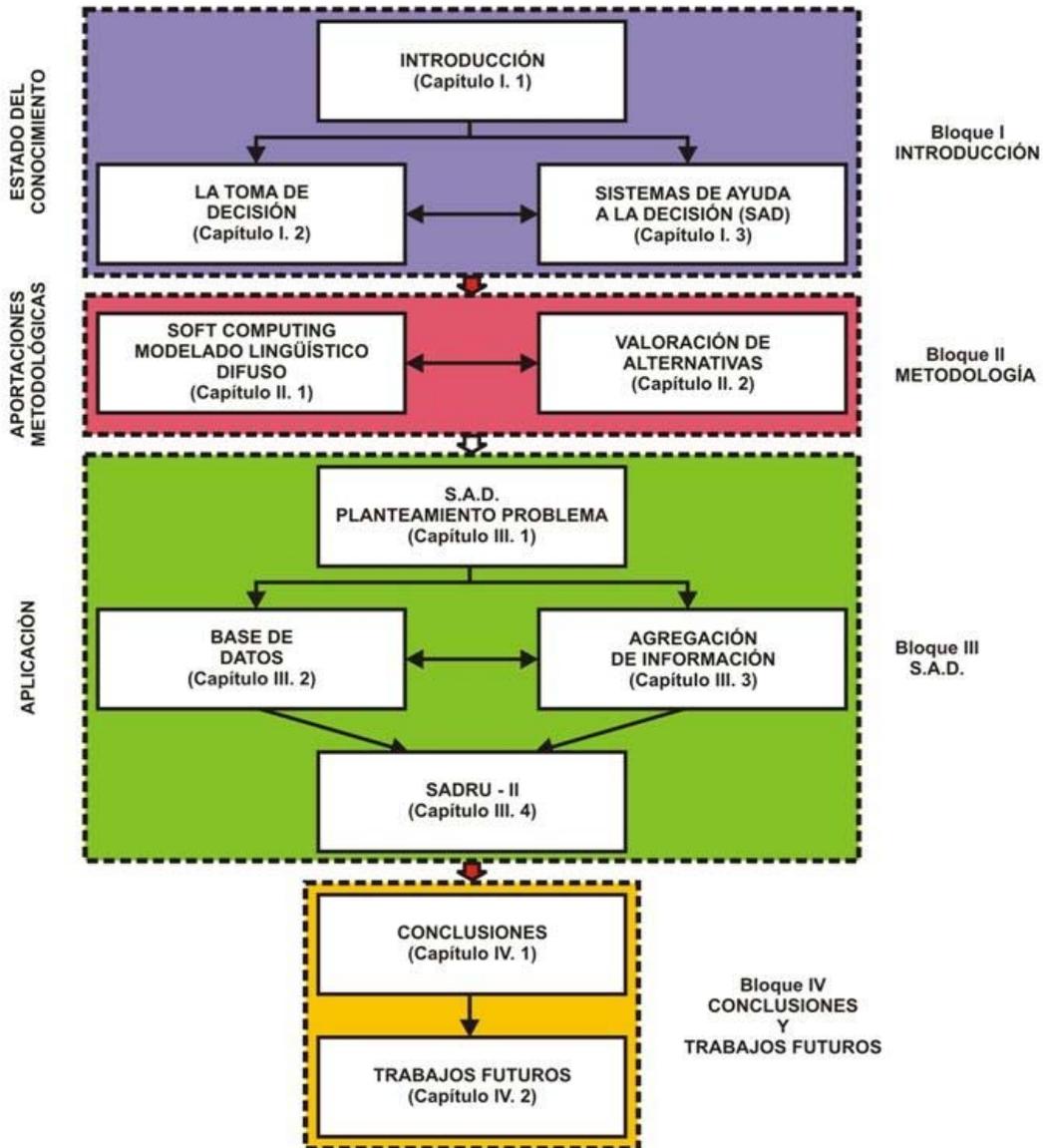


Figura I.2.: Esquema de desarrollo de la presente tesis doctoral

Tras esta visualización general del esquema de desarrollo de la tesis, a continuación se desarrolla más en detalle el contexto de los diversos capítulos.

El Bloque I Introducción se estructura en tres capítulos:

Por un lado el capítulo I.1. recoge la descripción del contexto, objetos, alcance y estructura de esta tesis.

El capítulo I.2 constituye el estado de conocimiento de la cuestión tratada en la tesis. Sintetiza el análisis crítico realizado en torno al desarrollo teórico del problema de la toma de decisión en el ámbito general de la teoría de la decisión. Se analizan los conceptos básicos de la decisión así como la clasificación de los distintos problemas de decisión. Por otro lado, se estudian las fases del proceso

de toma de decisión y nos situamos en la fase que será objeto de desarrollo en la tesis. Y finalmente se hace referencia al desarrollo histórico sobre la decisión multicriterio y se presentan los principales métodos de decisión multicriterio clásicos así como las distintas escuelas en las que se agrupan.

Finalmente el capítulo I.3, se estudian los Sistemas de Ayuda a la Decisión, SAD que serán la herramienta a desarrollar en nuestra aplicación, donde se describen lo que es la estructura de un SAD, así como los distintos tipos de SAD existentes.

El Bloque II. Metodología donde se aborda lo que es la aportación en si de esta investigación y el núcleo de la presente tesis, se dividen en dos capítulos:

Por un lado, el capítulo III.1, donde se estudia el entorno incierto donde nos vamos a mover en la evaluación de las alternativas y las herramientas con las que vamos a modelizar dicho entorno, como es la Soft Computing y en concreto la lógica difusa que nos permitirá movernos dentro del campo del modelado lingüístico difuso. En este capítulo incidiremos especialmente en la ordenación de números difusos y los métodos existentes y presentaremos aportaciones en este campo.

Asimismo, en el capítulo III.2, analizaremos los métodos de evaluación de alternativas que nos permitirán desarrollar un sistema integral de evaluación de alternativas donde utilizaremos un sistema híbrido para por un lado el análisis y obtención de los pesos de los criterios y por otro la evaluación y síntesis de las alternativas, en ambos casos analizamos lo pasos a seguir en el ámbito del modelado lingüístico difuso en el que trabajamos. Así a partir de las fortalezas de cada uno de los métodos clásicos analizados combinado con el modelado lingüístico difuso, en el que nos movemos, obtener un sistema robusto y fiable que pueda ser de aplicación en diversos ámbitos.

En el Bloque III Sistema de Ayuda a la Decisión para el ranking de universidades, planteamos la aplicación de las aportaciones metodológicas de esta investigación en un caso práctico, como es el ranking de universidades en el ámbito de la ingeniería industrial, mediante el desarrollo de un software de ayuda a la decisión que incluya las aportaciones de la tesis.

De esta manera dentro del Bloque III, tenemos, por un lado, el capítulo III.1 Planteamiento del problema, donde se plantea el problema a modelizar mediante el SAD, que nos va a servir de ejemplo como aplicación de la potencialidad de la investigación desarrollada.

En el Capítulo III.2 Base de Datos, analizamos uno de los elementos más importantes del SAD como es la base de datos del sistema y sus distintas entradas de datos.

En el Capítulo III.3 Agregación Información, estudiamos la agregación de la información disponible en la base de datos, para la posterior selección de la misma en el software propiamente dicho.

Como último capítulo del bloque de aplicación, en el Capítulo III.4 SADRU-II hacemos una descripción del software desarrollado para el problema del ranking de universidades en el campo de la ingeniería industrial así como el desarrollo de un caso a estudio.

Finalmente el Bloque IV Conclusiones y Trabajos futuros, ofrece una perspectiva general del resultado del desarrollo de la tesis y sintetiza las conclusiones principales. En último lugar, se resume la aportación al conocimiento y se incluyen una serie de recomendaciones para futuras investigaciones.

# CAPÍTULO I.2

## La toma de decisión

---

### I.2.1. INTRODUCCIÓN

La toma de decisión resulta un proceso habitual en la vida cotidiana del ser humano. En multitud de ocasiones nos encontramos ante diferentes alternativas entre las que debemos seleccionar la que, a nuestro juicio, nos parece mejor o la que satisface el mayor número de necesidades requeridas, y el ámbito laboral no es una excepción. Los ejecutivos de las empresas y organizaciones, los responsables políticos, los directores de proyectos y en general los profesionales han de adoptar decisiones difíciles durante el transcurso de sus actividades. Estas decisiones difíciles según León [211], se caracterizan por:

- Observar intereses contrapuestos.
- Tener elementos de incertidumbre.
- Envolver distintas personas en la decisión.
- Poseer elementos fácilmente valorables y elementos difícilmente valorables.

Se puede afirmar que un individuo o colectivo tiene un problema de decisión cuando se plantea un conjunto bien definido de alternativas o cursos de acción posibles, al menos dos, y un conflicto tal que es necesario elegir una de las alternativas, o bien establecer en ese conjunto unas preferencias. Para Dieter [106], tomar una decisión es una situación que genera tensión psicológica a la mayoría de las personas que asumen esta responsabilidad. Esta tensión proviene de dos fuentes: la primera es la preocupación del decisor por las consecuencias materiales y sociales que se derivan de cualquier curso de acción que se haya elegido; la segunda fuente es el riesgo que se corre de perder el prestigio y autoestima del decisor.

A menudo se entiende que una buena decisión se da cuando, transcurrido el tiempo, las consecuencias se han mostrado favorables. Sin embargo, la mayor parte de las veces no se pueden comparar las consecuencias de una decisión adoptada con las que hubiera ocurrido si se hubiera adoptado una solución

diferente. Por este motivo resulta imprescindible considerar también el proceso mediante el cual se adoptó la decisión final para poder concluir o no que la solución fue la mejor posible, teniendo en cuenta la información disponible en el momento y los recursos que entonces se pudieron emplear. Se entiende, por tanto, que una decisión ha sido buena si se ha tomado con el mejor procedimiento disponible. En cambio, no se puede calificar una decisión como buena si ha dado buenos resultados pero no se conoce cómo se procedió en su adopción. Según León [211] una buena decisión tiene las siguientes características:

- Es una decisión en la que se ha trazado el objetivo que se quiere conseguir.
- Se ha reunido toda la información relevante.
- Se han tenido en cuenta las preferencias del decisor.

En proyectos de ingeniería la toma de decisión es una actividad intelectual esencial, sin la cual el proyecto no puede progresar. Durante el desarrollo de un proyecto se toman decisiones complejas; complejidad que viene marcada por la trascendencia que muchas de estas decisiones tienen para el proyecto, por las responsabilidades que ello implica para los proyectistas o directores de proyecto, por los agentes implicados o afectados por la decisión adoptada y por los diferentes criterios o puntos de vista que hay que tener en cuenta y que a menudo están en conflicto.

Se citan a continuación las diferentes razones que, según De Boer [100], justifica la atención especial que se debe prestar a la toma de decisión en proyectos:

- El incremento de la magnitud de los problemas de decisión como consecuencia del tamaño y complejidad de los proyectos que se desarrollan en la actualidad
- La necesidad que tienen las empresas de tomar buenas decisiones o tomar la mejor de las decisiones posibles, en un entorno económico cada vez más competitivo, para obtener mejores resultados.
- La limitación de los seres humanos a la hora de enfrentarse a problemas complejos de toma de decisiones. Ello es debido a la limitada capacidad de memoria de atención, a la tendencia a cambiar las metas y los valores y a ser selectivos en la adquisición y procesamiento de información.
- El aumento de la responsabilidad de los proyectistas debido a que cada vez la legislación exige mayor seguridad y calidad en los productos, instalaciones y obras de ingeniería, y por tanto, mayor rigor en los documentos del proyecto y en la dirección de su ejecución.

Antes de tomar cualquier decisión, los hechos, el conocimiento y la experiencia se deben reunir y evaluar en el contexto del problema. El proceso de toma de decisiones, normalmente se apoya en la experiencia del decisor o en la semejanza a decisiones anteriormente tomadas que llevaron a buenos resultados, y raras veces se basa en un método sistemático o herramienta de apoyo a la resolución

de tal disyuntiva. El Análisis de Decisión Multicriterio (en inglés *Multicriteria Decision Analysis*) se presenta como una valiosa herramienta para ayudar al decisor durante este proceso de toma de decisiones. Los métodos propuestos desde esta disciplina permiten abordar, de forma sistemática y ordenada, un problema en el que subyace una gran subjetividad. Ayudan a que todas las partes afectadas por el proceso de decisión participen en el mismo, suministran una gran cantidad de información, facilitan la búsqueda de consenso, permiten que el decisor aprenda sobre el propio problema de decisión y, en definitiva, ayudan a racionalizar un proceso complejo.

En los apartados siguientes se van a exponer los conceptos básicos del Análisis de Decisión Multicriterio y se van a presentar algunos de los métodos más conocidos que pueden ser de gran ayuda para el director de proyectos en la difícil tarea de tomar decisiones. Con estas técnicas no se pretende sustituir al decisor en el proceso de toma de decisiones, sino que este, de forma ordenada, sea capaz de determinar sus preferencias mediante una metodología que le aportará información y transparencia.

## **1.2.2. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE DECISIÓN**

Resulta conveniente en este momento definir los conceptos que se emplean con más frecuencia en relación a la Teoría de la Decisión, con el objeto de facilitar la comprensión de apartados posteriores.

### **1.2.2.1. DECISOR/A O UNIDAD DECISORA**

Individuo o conjunto de individuos que tienen la responsabilidad de tomar la decisión, Rios et al [263].

### **1.2.2.2. ANALISTA**

Es la figura que modeliza la situación concreta y que eventualmente, hace las recomendaciones relativas a la selección final. El analista no expresa opiniones personales, sino que se limita a reconocer las del decisor y a tratarlas de la manera más objetiva posible. Es frecuente que el decisor intente reemplazar al analista por un programa de ordenador. Sin embargo, la máquina no puede ofrecer más que un modelo predefinido, por lo que todo el peso del analista recae sobre los hombros del decisor: el ordenador es solamente un soporte para la formalización, la memorización y la reflexión.

### **1.2.2.3. AMBIENTE O CONTEXTO DE LA SITUACIÓN DE DECISIÓN**

Todo proceso de decisión transcurre en un contexto que se denomina ambiente o entorno. El conjunto de características que definen perfectamente la situación de decisión respecto al entorno se denomina estado del ambiente o de la naturaleza Rios et al [263].

#### 1.2.2.4. CRITERIOS: OBJETIVOS, ATRIBUTOS Y METAS

Los criterios de decisión  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$  donde  $C_j$  ( $j = 1, \dots, n$ ) constituyen los puntos de vista o parámetros que se utilizan para manifestar las preferencias del decisor, son elementos de referencia en base a los cuales se realiza la decisión. En la mayor parte de problemas de decisión multicriterio es difícil establecer estos criterios de decisión, no obstante su determinación resulta un paso esencial del proceso. Según Romero [266], el concepto de criterio engloba los conceptos de objetivo, atributo y meta:

- Un objetivo indica la dirección en la que la unidad decisora debería esforzarse para hacer las cosas mejor. Por ejemplo minimizar el presupuesto de ejecución de un proyecto.
- Los atributos son las características que definen a las alternativas y miden el grado de alcance o cumplimiento de un objetivo. Para cada alternativa se definen unos atributos que permiten definir la consecuencia de la decisión en relación con el sistema de preferencias del decisor. Los atributos siempre dan unos valores del decisor respecto a una realidad objetiva y se pueden expresar mediante una función matemática de variables de decisión, de tal forma que cada alternativa se puede caracterizar mediante un conjunto de medidas relacionadas con los objetivos del decisor. Por ejemplo: el volumen en euros del presupuesto total de ejecución de un proyecto.
- Una meta se define como el valor que cuantifica un nivel de logro aceptable que un atributo debe esforzarse por alcanzar. Por ejemplo: que el presupuesto total de ejecución de un proyecto sea inferior a 600.000 euros.

#### 1.2.2.5. PESOS

Los pesos o ponderaciones son las medidas de la importancia relativa que los criterios tienen para el decisor. Asociado a los criterios, se asigna un vector de pesos  $w = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$  siendo  $n$  el número de criterios.

En los problemas de toma de decisión multicriterio es muy frecuente que los criterios tengan distinta relevancia para el decisor, aunque esto no significa que los criterios menos importantes no deban ser considerados. Estas diferencias justifican la existencia de los pesos asociados a los criterios.

Existen en la bibliografía diferentes formas de asignación de pesos. Las más habituales son:

##### **Método de asignación directa**

Aquel en el que el decisor asigna directamente valores a los pesos. Se pueden asignar de diferentes formas: por ordenación simple, por tasación simple o por comparaciones sucesivas. El método de tasación simple, por ejemplo consiste en pedir al decisor que dé una valoración de cada peso en un cierta escala (0 a 5, 0

a 10, etc.); una vez obtenidas las valoraciones, estas se normalizan dividiendo cada valor por la suma de todos ellos.

### Método del autovector

En este método los pesos asociados a cada criterio son las componentes del autovector asociado al autovalor dominante de una matriz de comparaciones por pares entre los criterios.

#### 1.2.2.6. ALTERNATIVAS O DECISIONES POSIBLES

Se define el conjunto de alternativas como el conjunto finito de soluciones, estratégicas, acciones, decisiones, etc. posibles que hay que analizar durante el proceso de resolución del problema de decisión que se considere. Constituye el conjunto de posibles opciones definidas sobre las que la unidad decisora realiza una decisión. El conjunto de alternativas se designa por  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$  donde  $A_i$  ( $i = 1, \dots, m$ ) son cada una de las alternativas posibles.

Se supondrá que este conjunto  $A$  está formado por alternativas diferentes, excluyentes y exhaustivas. Diferentes porque cada alternativa está definida de tal forma que es claramente diferenciable del resto; excluyentes porque la elección de una de ellas imposibilita la elección de cualquier otra; y exhaustivas porque definido el conjunto, este constituye el universo de decisión. Estos términos se concretan en que se prohíbe que el decisor escoja una solución mixta, es decir intermedia entre dos alternativas  $A_i$  y  $A_j$ . También se le prohíbe escoger una alternativa que no pertenezca al conjunto de elección: si el decisor introduce una nueva alternativa es preciso volver a comenzar el análisis con el nuevo conjunto así definido.

#### 1.2.2.7. MATRIZ DE VALORACIÓN

Una vez establecidos los criterios y sus pesos asociados, se supone que el decisor es capaz de dar, para cada uno de los criterios considerados y para cada alternativa del conjunto de elección, un valor numérico o simbólico  $x_{ij}$  que expresa un evaluación o juicio de la alternativa  $A_i$  con respecto al criterio  $C_j$ . Esta evaluación puede ser numérica o lingüística y se puede representar en forma de matriz, denominada matriz de valoración ( $x_{ij}$ )

Tabla I.1: Matriz de valoración

	$w_1$	$w_2$	...	$w_n$
	$C_1$	$C_2$	...	$C_n$
$A_1$	$x_{11}$	$x_{12}$	...	$x_{1n}$
$A_2$	$x_{21}$	$x_{22}$	...	$x_{2n}$
$A_m$	$x_{m1}$	$x_{m2}$	...	$x_{mn}$

Cada fila de la matriz expresa valoraciones de la alternativa  $A_i$  con respecto a los  $n$  criterios considerados. Cada columna de la matriz recoge las evaluaciones o juicios emitidos por el decisor de todas las alternativas respecto al criterio  $C_j$ .

### I.2.2.8. SOLUCION EFICIENTE

Un conjunto de soluciones es eficiente cuando está formado por soluciones factibles, tales que no existe otra solución factible que proporcione una mejora en un atributo sin producir un empeoramiento en al menos otro de los atributos. A esta solución se le denomina solución Pareto eficiente en honor al economista italiano Pareto, Romero [266].

### I.2.3. CLASIFICACIÓN DE LOS PROBLEMAS DE DECISIÓN

Atendiendo a algunos de los conceptos definidos en el apartado anterior podemos establecer la siguiente clasificación de los problemas de decisión:

#### I.2.3.1. ATENDIENDO A LAS SITUACIONES DE DECISIONES

- **Programables:** Son problemas de decisión que tiene las siguientes características:
  - Son bien definidos
  - Son rutinarios
  - Tienen la información adecuada
  - Existen muchas reglas para seleccionar las alternativas

Las decisiones se pueden tomar a través de una tabla de decisión

- **No programables:** Son problemas de decisión que tienen las siguientes características:
  - No son bien definidos
  - No son rutinarios
  - No se tiene la información adecuada
  - No tienen tantas reglas para seleccionar las alternativas
  - El criterio usado es de tipo personal, sentido común; mayormente usado en el proceso de simulación
  - Tienen una extensa base de datos, en muchos casos se hace tedioso el procesamiento de la información.
  - Presencia de altos costes.

#### I.2.3.2. ATENDIENDO AL ESTADO DEL ENTORNO

- **Decisiones bajo certeza:** Llamados también determinísticos, debido a que son conocidos los estados de la Naturaleza y por tanto, los resultados o consecuencias establecidos para cada alternativa y estado de la naturaleza.
- **Decisiones bajo incertidumbre:** En la cual el decisor se enfrenta a situaciones que nunca han ocurrido y que tal vez no vuelvan a repetirse en el futuro de esta misma forma, no se conocen las probabilidades de

ocurrencia de los criterios. No hay información sobre los estados de la naturaleza

- **Decisiones bajo riesgo:** Son aquellos en los que existe un factor probabilístico de ocurrencia ligado a los criterios. Se conocen las probabilidades objetivas o subjetivas de los estados de la naturaleza.

#### 1.2.3.3. ATENDIENDO A LA NATURALEZA DE LAS ALTERNATIVAS

- **Continuo:** Las alternativas pertenecen a un conjunto infinito no numerable. El valor que representa a la alternativa pertenece a la recta real. Este tipo de decisiones son habituales en el mundo de la ciencia y la técnica, en el que se busca optimizar el valor de un parámetro técnico.
- **Discreto:** El conjunto de alternativas es finito.

#### 1.2.3.4. ATENDIENDO A LAS CARACTERÍSTICAS DE LA UNIDAD DECISORA

- **Uni-personal:** Si la unidad incluye una sola entidad, física o jurídica.
- **Grupo:** Si la unidad está formada por más de una entidad. En este caso el decisor es un conjunto de individuos interesados en el proceso de decisión, de tal forma que tienen que adoptar una solución única que refleje globalmente las opciones o intereses del grupo. Este tipo de unidades son cada vez más frecuentes. En la actualidad se extiende cada vez más en el ámbito empresarial la cultura de la multidisciplinaridad, es decir, la formación de equipos de trabajo mediante profesionales de diferentes áreas. Este hecho viene a reforzar la importancia de la consideración de varias entidades en el proceso de toma de decisiones.

### II.2.4. FASES DE UN PROCESO DE TOMA DE DECISIÓN MULTICRITERIO

El proceso de toma de decisiones se plasma en el siguiente gráfico Figura I.3:

“La toma de decisiones es un proceso de selección entre cursos alternativos de acción, basado en un conjunto de criterios, para alcanzar uno o más objetivos” [292].

El proceso de toma de decisión se divide generalmente en cuatro partes:

#### 1.2.4.1. ESTRUCTURACIÓN DEL PROBLEMA DE DECISION

Es parte del proceso de toma de decisión que comprende los siguientes componentes:

- **Definición del problema:** Es el paso inicial para la toma de decisión; sin un problema bien definido, no hay objetivo definido y no hay una solución veraz.
- **Identificación de alternativas:** Es la detección de la cantidad de opciones que tiene el decisor para efectuar la decisión.

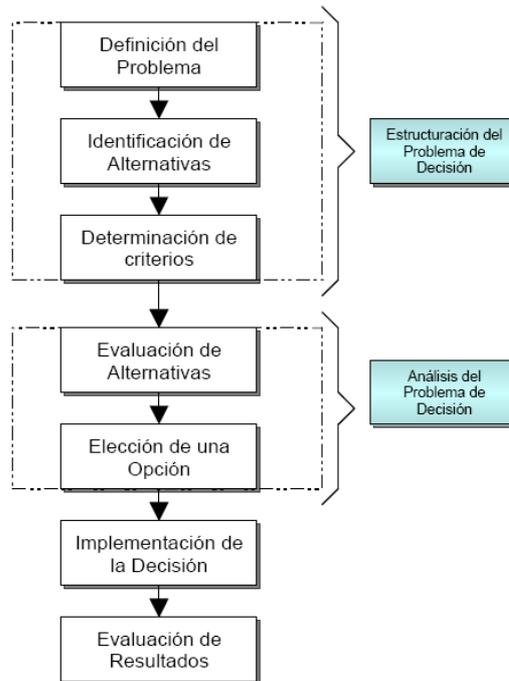


Figura I.3: Representación de las fases de un proceso de decisión multicriterio.

- **Determinación de criterios:** Corresponde a las características más relevantes que los decisores han considerado para luego evaluar en función de ellos, que alternativa resulta más conveniente.

Existen dos tipos de criterios: cualitativos y cuantitativos.

#### 1.2.4.2. ANÁLISIS DEL PROBLEMA DE DECISIÓN

Esta es la fase en la que se va a centrar la presente tesis doctoral.

Es la parte del proceso de toma de decisión consecuente con la estructuración del problema de decisión, que comprende los siguientes componentes:

- **Evaluación de alternativas:** Depende del método de evaluación utilizado en cada caso.
- **Elección de una opción o ranking de alternativas:** En función de la evaluación de las alternativas, se obtiene una alternativa con mejor perspectiva que otras.

En el bloque II de metodología analizaremos en profundidad estas dos componentes.

#### 1.2.4.3. IMPLEMENTACIÓN DE LA DECISIÓN

Al tener la alternativa más favorable, se procede a su ejecución.

#### 1.2.4.4. EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS

Ya estando en ejecución, los resultados que genera la alternativa pasan a ser evaluados.

## I.2.5. PRINCIPALES MÉTODOS DE DECISIÓN MULTICRITERIO DISCRETOS

### II.2.5.1. REFERENCIAS HISTÓRICAS SOBRE LA DECISIÓN MULTICRITERIO

Desde un punto de vista científico, la decisión multicriterio aparece en el campo de la Economía, ligada a los trabajos de los economistas a finales del siglo XIX y principios del XX sobre el comportamiento de los consumidores a la hora de elegir en la compra de un producto. Estas investigaciones económicas son las precursoras del concepto de decisión multicriterio.

La formulación adoptada en esta época consiste en postular que los agentes económicos buscan maximizar sus funciones de utilidad, las cuales expresan la elección del consumidor o del productor. Sin embargo, en 1896 Pareto mostró que en situaciones en las que varios agentes económicos realizan elecciones diferentes y en conflicto, éstos no podían obtener su satisfacción máxima al mismo tiempo: siendo los recursos limitados, lo que uno gana lo hace en detrimento de otro. Estas situaciones se denominan *óptimos de Pareto*. Ante esta problemática surgieron las técnicas de decisión multicriterio con el objetivo de resolver estas situaciones y hallar el modo de satisfacer, en la medida de lo posible, al mayor número de agentes económicos, intentando buscar un equilibrio entre los intereses contrapuestos de éstos.

Las técnicas de toma de decisión multicriterio, como tal, ha sido materia de investigación desde los años 40 y ha tenido un importante desarrollo en las últimas décadas.

En 1944, John von Neumann, uno de los físicos más importantes del pasado siglo, fundador del proyecto Manhattan y padre de la física cuántica, y Oscar Morgenstern, economista austriaco, publican la primera obra acerca de juegos de estrategia desde una perspectiva económica y la más importante en lo que se refiere al comportamiento individual en ambiente de riesgo. Su título es “Theory of games and economic behaviour”[317], y plantea un nuevo paradigma en lo que al concepto de utilidad se refiere, planteamiento que sigue vigente a pesar de los múltiples intentos que desde entonces se han efectuado para desbancarlo. Básicamente, lo que ambos autores llevan a cabo es una aproximación metodológica que, para resolver el problema de la decisión en régimen de conflicto, les lleve a plantear la racionalidad del individuo. Una de las mejores interpretaciones que existen de la axiomática de von Neumann y Morgenstern es la que posteriormente sugirieron Luce y Raiffa en 1957 [223].

El matemático francés Bernard Roy planteo en 1968 un nuevo enfoque. Este autor inspirador de la denominada Escuela Francesa, se desmarca de la teoría de la decisión clásica y crea lo que denomina “Ciencia de Ayuda a la Decisión Multicriterio”. Esta escuela pretende construir una ciencia que ayude al decisor a encontrar soluciones satisfactorias. Sus métodos se basan en comparar entre sí las diferentes alternativas en base a cada criterio y después agregar esta información considerando la fuerza de las evidencias a favor y en contra de la

selección de una alternativa respecto a otra. Los métodos más conocidos son los de la familia ELECTRE y la familia PROMETHEE, métodos denominados de sobreclasificación (en inglés *outranking methods*).

En Estados Unidos, las discusiones sobre la toma de decisiones multicriterio se centraron en los años 70 sobre la posibilidad de agregar las preferencias del decisor por cada criterio en una única función “suma” de las anteriores. Esta función de utilidad global se toma como punto de partida del problema de programación matemática multiobjetivo. Este modelo tiene un fundamento teórico sólido que constituye la denominada Teoría de la Utilidad Multiatributo (MAUT). En esta línea destacan los trabajos de Keeney y Raiffa [172] que constituye un libro clásico sobre el método MAUT.

A principio de los 90 se pueden ya distinguir claramente tres enfoques distintos en las investigaciones dentro de la ciencia de la Decisión: *la vía del realismo*, *la vía axiomática* y *la vía del constructivismo*. La primera defiende que existe una realidad cierta independientemente del grado de conocimiento que se tenga de ella y que por tanto la función del investigador es descubrirla; la segunda vía trata de encontrar unos principios fundamentales, llamados axiomas, a partir de los cuales, y una vez aceptados, se pueden extraer unas consecuencias lógicas que conducirán a la verdad; finalmente la vía del constructivismo reduce el problema de la toma de decisión multicriterio a construir una relación de preferencia global sobre el conjunto de alternativas, teniendo en cuenta las características individuales del decisor y que los datos del problema van cambiando a lo largo de la decisión.

Durante la década de los 90, y en especial a finales de la misma, los métodos de toma de decisión multicriterio (MCDM, del inglés *Multi-Criteria Decision Making*) han comenzado a trascender del ámbito académico y se han extendido al ámbito público y empresarial. Hoy en día estas técnicas se emplean con múltiples y diversas finalidades: localización de empresas, selección de maquinaria o contratistas, predicciones financieras, definición de estrategias empresariales, etc. Pero todavía son muchas las aplicaciones que quedan por explotar.

Los métodos de decisión multicriterio son poderosas herramientas que ayudan a generar consenso en contextos complejos de decisión. Se pueden aplicar estas técnicas a casos en los que sea necesaria la confluencia de intereses y puntos de vista de diferentes grupos o personas. Esto permite que todas las partes interesadas participen en el proceso de toma de decisiones.

“Considerando un grupo formado por varios agentes, cada uno con sus propias preferencias, como único colectivo que tiene varios criterios de elección diferentes, recaemos en la problemática multicriterio” [30].

En el presente apartado se va a considerar el problema de la toma de decisión multicriterio cuando el conjunto de alternativas factibles es numerable. En este caso se dice que el problema es un *problema de decisión multicriterio discreto*.

En adelante se supondrá que el número de alternativas no es muy elevado y que además se conocen explícitamente.

Los problemas multicriterio se clasifican en dos categorías, los de programación múltiple objetivo y los de evaluación multicriterio. En nuestro caso, nos vamos a centrar en los de la segunda categoría. La mayoría de estos métodos pertenecen a dos escuelas principales de métodos multicriterio, la escuela Americana y la escuela Europea

### 1.2.5.2. LA ESCUELA AMERICANA

En 1944 Von Neumann y Morganstern [317] axiomatizaron la teoría de utilidad esperada y así asentó las bases de la Teoría de la Utilidad Multi-atributo (MAUT), como aplicación en econometría.

Por un lado, los métodos integrados dentro de la Teoría de la Utilidad Multi-atributo. Estos métodos parten del supuesto de que el decisor trata de maximizar una función de utilidad que agrega los distintos criterios que intervienen en el problema. Cuando el problema es discreto y no existe una situación de incertidumbre, esta función se denomina *función valor*.

MAUT asume que un problema de decisión puede modelizarse mediante funciones valoradas reales que pueden ser maximizadas/minimizadas entre las alternativas. Algunos autores han sugerido que MAUT tiene dos variantes: La escuela de Harvard [172] y la escuela de Stanford [153]. La diferencia entre ellas es que en la escuela de Stanford no es necesario calcular una medida global para tomar una decisión.

Los métodos basados en la función de valor consisten en construir una función ( $v$ ) que asocia un número real a cada una de las alternativas posibles. Este número refleja el valor o la utilidad que cada alternativa tiene para el decisor.

La principal dificultad de estos métodos consiste precisamente en encontrar dicha función de valor, pero una vez obtenida, el problema de decidir la mejor de las alternativas se reduce a obtener el máximo/mínimo de todos los valores calculados.

Basados en la existencia de la función valor la escuela americana propone varios métodos prácticos, como son los métodos de la suma ponderada, el método de las Jerarquías Analíticas o Proceso Analítico Jerárquico (AHP), que según sus autores constituyen una teoría y finalmente el método SMART (*The Simple Multi-attribute Rating Technique*).

#### **El método de la suma ponderada**

El método de la suma ponderada asume que la función valor buscada se puede descomponer y asimilar a un modelo aditivo, es decir, presentarse de la forma:

$$v = \lambda_1 \cdot v_1 + \lambda_2 \cdot v_2 + \dots + \lambda_n \cdot v_n$$

Los datos de partida del método son los expresados en la matriz de valoración  $(x_{ij})$  de forma que se evalúa, para cada alternativa, el grado de cumplimiento de cada uno de los criterios. Se supone que los juicios que evalúan cada alternativa según cada criterio admiten representaciones numéricas sobre una escala de valores reales.

Una vez obtenida la matriz de valoración, ésta debe ser normalizada, de forma que los valores de los criterios, generalmente expresados en escalas distintas, se puedan comparar y no se produzcan sesgos.

Una vez obtenidos los valores normalizados  $r_{ij}$  para cada alternativa  $A_i$ , y conocidos los pesos  $w_j$  asociados a cada uno de los criterios que se consideran, el método de la suma ponderada construye la función valor de la siguiente forma:

$$v(A_i) = \frac{\sum_{j=1}^n (w_j \cdot r_{ij})}{\sum_{j=1}^n w_j}; \quad i = 1, 2, \dots, m$$

Donde  $v(A_i)$  es un valor promedio ponderado para cada alternativa  $A_i$ , que refleja el valor que cada alternativa tiene para el decisor. Así pues, con la ordenación de las alternativas en base a los valores  $v(A_1), v(A_2), \dots, v(A_m)$  es posible resolver el problema de decisión y determinar la mejor alternativa de entre las posibles, que será la de suma ponderada mayor/menor.

### **El Proceso Analítico Jerárquico**

Desarrollado por Thomas Saaty en 1980 [275], consiste esencialmente en formalizar nuestra comprensión intuitiva de problemas complejos utilizando una estructura jerárquica. Básicamente, tiene tres conceptos fundamentales: Estructuración del problema de decisión complejo como una jerarquía de objetivo, criterios y alternativas, comparaciones por pares de elementos del mismo nivel de la jerarquía con respecto a cada criterio del nivel superior, y finalmente de manera vertical se sintetizan los juicios sobre los diferentes niveles de la jerarquía. Se puede ver una aplicación del método en Kablan [163].

Se desarrollará más ampliamente esta metodología en un capítulo específico dentro del bloque II de metodología.

### **El método SMART**

El método SMART fue desarrollada por Edwards y Barron [113], donde se juzga la actuación de la alternativa mediante la elección de un apropiado valor entre un límite inferior predeterminado para la peor (real o imaginaria) alternativa y un límite superior para la mejor (real o ideal) alternativa.

La ventaja del modelo SMART es que es independiente de las alternativas, Lootsma y Schuijt [221]. Cuando las evaluaciones de las alternativas no son relativas, cambiando el número de alternativas considerado no cambiarán las puntuaciones de la decisión con respecto a las alternativas. Esta característica es

particularmente útil cuando se añaden nuevas alternativas a la comparación existente.

### 1.2.5.3. LA ESCUELA EUROPEA

La Escuela Europea, con el trabajo de B. Roy en los años 70 [269] y la contribución de varios científicos europeos, fue la fundadora de la metodología de Ayuda a la Decisión Multicriterio por reflejar una actitud dentro de la línea del pensamiento constructivista. Esta familia de métodos persigue ayudar al decisor a resolver el problema teniendo en cuenta las dificultades que se derivan para la construcción de la función de valor. Se describen por su importancia, los métodos ELECTRE (*The ELimination Et Choix Traduisant la REalité*) los métodos PROMETHEE (*Preference Ranking Organization meted of Enrichement Evaluations*), y el método MACBETH (*The Measuring by a Categorical Based Evaluation Technique*), métodos también llamados de sobreclasificación.

#### **Método ELECTRE**

El método ELECTRE [268;270] pertenece a una familia de métodos basados en relaciones de superación o sobreclasificación para decidir acerca de la determinación de una solución, que sin ser óptima pueda considerarse satisfactoria; además de obtener una jerarquización de las acciones o alternativas bajo análisis. Originaria y desarrollada por la escuela francófona (principalmente en Francia, Bélgica, Suiza aunque puede considerarse continental, ya que se verifican importantes contribuciones de los Países Bajos y Polonia, entre otros, a tal esquema), en la actualidad han sido desarrollados los procedimientos ELECTRE I, II, III, IV, IS; y ELECTRE TRI, los que brindan procedimientos para resolver diferentes tipos de problemas suscitados en el tratamiento de la teoría de la decisión.

#### **Método PROMETHEE**

El método PROMETHEE desarrollado por Vinke y Brans en 1985 [316] consiste, como en ELECTRE III, en la construcción de relaciones de superación valorizadas, incorporando conceptos y parámetros que poseen alguna interpretación física o económica fácilmente comprensibles por el decisor. PROMETHEE hace uso del concepto de pseudocriterio ya que construye el grado de superación entre cada par de acciones ordenadas, tomando en cuenta la diferencia de puntuación que esas acciones poseen respecto a cada atributo. La evaluación de esas diferencias puede realizarse mediante funciones valor posibles y que son utilizadas de acuerdo a las preferencias del decisor, quién además debe proporcionar los umbrales de indiferencia y de preferencia asociados a estos pseudocriterios.

Otras variantes del método plantean situaciones más sofisticadas de decisión, en particular problemas con un componente estocástico. Así se han desarrollado las versiones PROMETHEE II, PROMETHEE III, PROMETHEE IV y PROMETHEE V. En PROMETHEE V Brans y Mareschal [51] se incorpora

una filosofía de optimización entera a efectos de abordar problemas de selección de inversiones con restricciones presupuestarias.

### **Método MACBETH**

MACBETH es un método interactivo que mide el grado de preferencia de un decisor sobre un conjunto de alternativas. Fue desarrollado por Bana et al [28]. Construye una función criterio desde un punto de vista fundamental y determina los parámetros relacionados con la información entre criterios (pesos) en la fase de agregación.

El método utiliza un procedimiento mediante un cuestionario inicial iterativo que compara dos niveles al mismo tiempo, requiriendo solamente un juicio de preferencia cualitativo. Empieza con la comparación de la opción más atractiva y la menos atractiva. La opción más atractiva se compara entonces con el resto de opciones y el siguiente paso considera la comparación de la segunda opción más atractiva con la tercera, y así con todas.

#### **1.2.6.5. OTROS MÉTODOS DE DECISIÓN MULTICRITERIO**

Finalmente como otros métodos interesantes podemos considerar el método ZAPROS (abreviación de las palabra Rusas: *Closed Procedures near Reference Situations*), el método TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*), que se basa en el cálculo de la distancia euclídea de una alternativa a las soluciones ideal y antiideal previamente establecidas y el método VIKOR que determina una solución de compromiso, proporcionando una “utilidad de grupo” para la “mayoría” y una penalización mínima individual para el “opponente”.

### **Método ZAPROS**

La técnica ZAPROS fue desarrollado por Larichev y Moshkovich [205;206] utiliza evaluaciones cualitativas mediante las que el decisor elabora ordenes parciales en un posible gran conjunto de alternativas, pero el método solo proporciona un orden parcial y no garantiza una ordenación completa.

El método está basado en operaciones psicológicamente validas para la elicitación de información de un decisor: comparaciones de dos distancias entre las evaluaciones en las escalas ordinales de dos criterios. La información recibida por el decisor se utiliza para la construcción de relaciones binarias entre un par de alternativas que producen relaciones de preferencia, indiferencia o incompatibilidad.

### **Método TOPSIS**

El método de Programación por Compromiso, también llamado TOPSIS, es una técnica de programación matemática utilizada originalmente en contextos continuos y que ha sido modificada para el análisis de problemas multicriterio de tipo discretos. Es utilizada para identificar soluciones que se encuentran lo más cerca posible a una solución ideal aplicando para ello alguna medida de

distancia. Las soluciones así identificadas se denominan soluciones compromiso y constituyen el conjunto de compromiso.

Esta técnica está basada en el concepto de que una alternativa seleccionada debe tener la distancia más corta posible hacia la solución ideal positiva y estar lo más lejos posible respecto a la solución ideal negativa. Fue desarrollada por Hwang y Yoon [156], recibiendo posteriormente aportes de Zeleny [365]. Fue mejorada por los propios autores en 1987 y más tarde por Lai et al [203] en 1993.

Una solución ideal se define como una colección de niveles ideales (o de valoraciones) en todos los atributos considerados, pudiendo suceder que tal solución normalmente sea inalcanzable o que sea no factible. Esta noción se basa en la idea de que el logro de tal meta se encuentra en la racionalidad de la elección humana. El vector compuesto por los mejores valores del  $j$ -ésimo atributo respecto a todas las alternativas posibles es quien recibe el nombre de solución ideal positiva. En contraposición, la solución ideal negativa estaría dada por el vector que contiene las peores valoraciones alcanzables en los atributos.

De este modo puede ocurrir que una alternativa seleccionada desde el punto de vista de su distancia más corta respecto de la solución ideal positiva deba competir con otra alternativa que se encuentra lo más lejos posible de la solución ideal negativa. Por ello, y a fin de definir la solución ideal, el método TOPSIS define un índice de similaridad (o de proximidad relativa) que se construye combinando la proximidad ideal positiva y la lejanía respecto al ideal negativo.

El método se desarrolla en una serie de etapas: primero se normalizan las valoraciones asignadas a las diversas alternativas; luego se calculan los valoraciones normalizadas ponderadas; de allí se identifican y/o definen las soluciones ideal positiva e ideal negativa del problema bajo análisis, en términos de los valores normalizados ponderados; así mismo se calculan las medidas de separación o distancia a la soluciones ideales entre las alternativas, mediante alguna noción de distancia métrica, que puede ser la euclídea. Cualquiera que sea la noción de distancia utilizada, está se calcula respecto a la solución ideal positiva y respecto a la solución ideal negativa; finalmente se construyen las semejanzas a la solución ideal como índice respecto a la solución ideal negativa, lo que implica que dicho índice combina los dos aspectos o metas definidos al principio.

La ordenación por preferencia de las soluciones surge de colocar las alternativas en orden decreciente respecto a las semejanzas estimadas en el último paso ya que el valor más alto representa aquella alternativa que se encuentra más cerca del ideal positivo en relación a la distancia respecto al ideal negativo.

Más extensamente desarrollaremos esta metodología en el bloque II de metodología en un capítulo aparte.

## Método VIKOR

El método VIKOR fue introducido por Opricovic [249], como una técnica aplicable para implementar dentro de los MCDM.

El método VIKOR se desarrolló para sistemas complejos de optimización multicriterio. Este determina una lista-ranking de compromiso, la solución de compromiso y los intervalos de estabilidad de pesos para la estabilidad de las preferencias de la solución de compromiso obtenida con los pesos iniciales (dados). Este método se centra en la ordenación y selección de un conjunto de alternativas en presencia de criterios en conflicto. Introduce un índice de ordenación multicriterio basado en la medida particular de “proximidad” a la solución “ideal”.

Se asume que cada alternativa se evalúa de acuerdo a cada función criterio, la ordenación de compromiso puede representarse mediante la comparación de las medidas de proximidad a la alternativa ideal. La medida multicriterio para la ordenación de compromiso se desarrolla mediante la utilización de la *métrica- $L_p$*  como una función de agregación en un método de programación por compromiso. [349;365] Las diferentes alternativas se denotan como  $a_1, a_2, \dots, a_J$ . Para la alternativa  $a_j$ , la valoración del  $i$ -ésimo aspecto se denota mediante  $f_{ij}$ , es decir,  $f_{ij}$  es el valor de la  $i$ -ésima función criterio para la alternativa  $a_j$ ; siendo  $n$  el número de criterios.

Siendo la definición de la *métrica- $L_p$*  del método VIKOR:

$$L_{p,j} = \left\{ \sum_{i=1}^n \left[ w_i (f_i^* - f_{ij}) / (f_i^* - f_i^-) \right]^p \right\}^{1/p},$$

$$1 \leq p \leq \infty; j = 1, 2, \dots, J.$$

Donde  $f_i^* = \max_j f_{ij}$  y  $f_i^- = \min_j f_{ij}$  si la  $i$ -ésima función representa un criterio de beneficio.

La ordenación mediante VIKOR puede realizarse con diferentes valores para los pesos de los criterios, analizando el impacto de los estos en la solución de compromiso propuesta. El método VIKOR determina los intervalos de estabilidad de los pesos, utilizando la metodología propuesta por Opricovic [249]. La solución de compromiso obtenida con los pesos iniciales puede reemplazarse con el valor de un peso que no se encuentra en el intervalo de estabilidad. El análisis de los intervalos de estabilidad de pesos para un solo criterio se realiza para todas las funciones criterio, con el mismo valor inicial de los pesos (dados). De este modo, las preferencias de estabilidad de una solución de compromiso obtenida deberían analizarse utilizando el programa VIKOR.

VIKOR es una herramienta en la toma de decisión multicriterio, particularmente en una situación donde el decisor no es capaz, o no sabe expresar sus preferencias al comienzo del diseño del sistema. La solución de compromiso obtenida puede ser aceptada por los decisores porque proporciona una máxima “utilidad de grupo” de la “mayoría” y un mínimo de penalización

individual para el “oponente”. La solución de compromiso podría ser la base para negociaciones, incluyendo las preferencias del decisor para el peso de los criterios.



## CAPÍTULO I.3

### **Sistemas de Ayuda a la Decisión (SAD)**

---

#### **I.3.1. INTRODUCCIÓN**

Muchos problemas a los que debemos enfrentarnos son extremadamente complejos por la presencia de varias fuentes de incertidumbre, varios objetivos y metas conflictivas, posibles impactos de las decisiones a largo plazo,... Aunque en ocasiones es posible resolverlos mediante la experiencia y la intuición, o de forma manual, se ve repetidamente probado que aproximarse así a los problemas complejos puede conducir a malas soluciones [264]. Los SAD están especialmente indicados para resolver varias veces el mismo problema complejo.

La disponibilidad de diversas formas de solucionar problemas con una alta calidad, aparte del valor intrínseco que conlleva, supone una ventaja cuando dichas soluciones están disponibles para los expertos o decisores que tienen que abordar cada problema, permitiéndoles disponer de un mayor nivel de conocimiento e información que los guíe en la toma acertada de decisiones. Pero, una vez más, la realización totalmente manual de estas tareas es un trabajo tedioso y complicado, especialmente cuando estamos abordando problemas en los que el volumen de datos disponibles es muy grande, como es en ocasiones la valoración de alternativas.

Los Sistemas de Ayuda a la Decisión (SAD) [290], surgidos a comienzos de la década de los 70, son soluciones informáticas que pueden usarse para ayudar en la toma compleja de decisiones y la resolución de problemas de forma estructurada. Sobre este planteamiento, el diseño clásico de SAD se compone de componentes para: (i) manejo de datos tanto internos como externos, información y conocimiento; (ii) funciones potentes de modelado y (iii) el diseño de interfaces de usuario sencillas pero poderosas. En general, la investigación desarrollada en este área se ha centrado generalmente en cómo se puede mejorar la eficiencia y la efectividad con la que un usuario toma una decisión haciendo uso de tecnologías de la información.

Desde el origen de los SAD, las tecnologías de la información han evolucionado mucho y, consecuentemente, los SAD también han evolucionado

sustancialmente, incorporando en su diseño muchas técnicas y elementos nuevos, como los almacenes de datos (data warehouses), el procesamiento analítico en línea (On-Line Analytical Processing u OLAP), la minería de datos (data mining) y las tecnologías web. Los SAD son un campo tecnológicamente rico cuya naturaleza e historia se percibe desde distintos puntos de vista por diferentes personas, con nociones diferentes de qué ha pasado hasta el momento en el campo y qué es importante (ver [21;257] para más información).

Un SAD puede componerse generalmente de varios subsistemas [310]:

1. *Subsistema de manejo de datos:* Contiene una base de datos con los datos más relevantes para la situación, que se maneja por un sistema **gestor de base de datos (SGBD)**.
2. *Subsistema de manejo de modelos:* Incluye modelos que proporcionan las capacidades analíticas del sistema, así como el software para su manejo, que suelen llamarse **sistema gestor de la base de modelos (SGBM)**. Los modelos pueden estar definidos mediante un lenguaje de modelado o ser simplemente métodos algorítmicos de resolución de problemas.
3. *Subsistema de manejo de conocimiento:* Este subsistema está presente en los SAD más avanzados, y puede ser tanto un sistema de apoyo a los otros subsistemas como un componente independiente. Contienen un **sistema gestor de la base de conocimiento (SGBC)**, y proporciona funciones inteligentes que complementan la inteligencia propia del decisor. Puede tener interconexión con una base de conocimientos a nivel de empresa.
4. *Subsistema de interfaz del usuario:* Es el medio mediante el cual el usuario puede comunicarse y controlar el SAD. El usuario se considera parte del propio sistema, y muchas de las contribuciones únicas hechas en el terreno de los SAD derivan de la interacción intensiva entre el ordenador y el decisor.

El énfasis en el uso de un SAD hay que hacerlo en el hecho de que faciliten ayuda a los decisores en términos de aumentar la efectividad del esfuerzo a decidir. Esto supone la formulación de alternativas, el análisis de sus impactos, y la interpretación y selección de las opciones apropiadas para ser llevadas a cabo. Aunque importante, la eficiencia en términos del tiempo requerido para desarrollar una decisión, generalmente es un asunto secundario desde el punto de vista de la efectividad. Generalmente los SAD se suponen que van a ser usados en situaciones de tipo estratégico o táctico, y mucho menos en situaciones operativas. (En situaciones operativas, que a menudo están bien estructuradas, un sistema experto podría ser más conveniente).

Hay muchísimas áreas de aplicación en las que el uso de SAD es potencialmente prometedor, incluyendo la planificación y gestión (como puede ser en proyectos de ingeniería), gestión operativa y esencialmente en cualquier área en la que la gestión tenga que admitir situaciones de decisión con una estructura inicial poco familiar.

### I.3.2. PRESENTACIÓN Y TAXONOMÍA DE LOS PROBLEMAS DE DECISIÓN

Numerosas áreas han contribuido al desarrollo de los SAD. Estas incluyen las Ciencias de la Computación, que proporcionan las herramientas hardware y software necesarios para su diseño e implementación. En particular, las Ciencias de la Computación proporcionan las herramientas de programación y de diseño de Bases de Datos necesarias para los SAD. Por otro lado, el campo de la Gestión y la Investigación Operativa proporcionan el substrato teórico para el necesario análisis de decisiones de cara a un diseño útil y a un enfoque normativo de la toma de decisiones. El área de la conducta organizativa, y las ciencias cognitivas y de la conducta, proporcionan fuentes ricas de información relativa a como las personas y las organizaciones procesan la información y hacen juicios de una forma descriptiva. Ciertos conocimientos de estas áreas son necesarios para el diseño efectivo de este tipo de sistemas, sobre todo para la gestión y generación de diálogos.

Ha habido muchos intentos de clasificar los diferentes tipos de situaciones de decisión existentes. Entre todas ellas, tiene nuestro propósito especial interés la Taxonomía de Anthony, quien describe cuatro tipo de situaciones:

1. Decisiones de Planificación Estratégica. Se trata de decisiones relativas a la elección de políticas y objetivos de alto nivel, y están asociadas a la asignación de recursos.
2. Decisiones de Control de la Gestión. Son decisiones que hay que tomar con el propósito de asegurar la efectividad en al adquisición y en el uso de recursos.
3. Decisiones de Control Operativo. Se trata de decidir con el objetivo de garantizar la efectividad en la realización de operaciones.
4. Decisiones de Realización Operativa. Son decisiones del día a día que hay que tomar mientras se realizan operaciones.



Figura I.4: Relaciones entre decisiones

La Figura I.4 ilustra como se relacionan estas decisiones y la forma en que generalmente se influyen. Un aspecto clave es que decisiones convocas consecuencias se hace menos veces que las decisiones de gran consecuencia.

Por otro lado Simon [292] describe las decisiones como estructuradas y no estructuradas dependiendo de si el proceso de decisión puede escribirse explícitamente antes del momento en si de tomar la decisión. Esta taxonomía podría parecer que nos conduce directamente a que las habilidades de los expertos (el razonamiento global), las reglas (heurísticas) o el razonamiento formal (la evaluación global) se usan normativamente para hacer juicios. Generalmente, se prefiere pre-estructurar las decisiones de realización operativa que las decisiones de planificación estratégica. Así, usualmente los sistemas expertos se cree que son más apropiados para las decisiones de control operativo y de realización operativa que para las otras dos situaciones. (Muchos sistemas expertos se basan en el uso extensivo de los que suelen llamarse Reglas de Producción. Este razonamiento basado en reglas puede no ser conveniente para situaciones que requieran un razonamiento basado en conocimiento formal o un razonamiento experto basado en habilidades). De una forma similar los SAD a menudo serán más apropiados para la planificación estratégica y el control de la gestión que para el control operativo y la realización operativa. Básicamente no hay necesidad de soporte de decisiones para decisiones bien estructuradas.

Sin embargo, puede ser deseable automatizar decisiones bien estructuradas, tales como las de aquellas situaciones que son rutinarias para el decisor. Alternativamente, una persona sin experiencia podría resultar que tuviera que tomar decisiones. Un sistema experto podría ser la clave para una persona tal, ya que para ella las situaciones en las que toma decisiones podrían estar no bien estructuradas. Esto nos lleva a una conclusión imprecisa en el sentido de que, muy frecuentemente, el papel de un sistema experto y del de un SAD van a poder ser confundidos, sin embargo tienen objetivos y funciones diferentes que habrá que aclarar en cada situación concreta, ya que su significación va a estar en función del usuario del mismo en términos de sus capacidades y conocimientos previos.

Hay una serie de tareas que un SAD debería admitir. Debería ayudar al decisor en la formulación o concepción de la situación de decisión en el sentido de reconocer necesidades, identificar los objetivos apropiados por los que evaluar si una solución va a ser fructífera, y generar cursos de alternativas que satisfagan las necesidades y los objetivos. También debería ayudar a aumentar las capacidades del decisor para obtener los posibles impactos que tendrán las ejecuciones de los diferentes cursos de acción. Esta capacidad analítica deber estar asociada con una capacidad de mejorar las habilidades del decisor para interpretar esos impactos en términos de objetivos. Esta capacidad de interpretación conducirá a la evaluación de las alternativas y después a la selección de una alternativa. Estas tres etapas de formulación, análisis e interpretación son etapas fundamentales para el análisis formal de temas difíciles. Es esencial notar que el propósito del un SAD es *ayudar a las personas a la realización de tareas cognitivas básicas que suponen decisiones, juicios y*

*elecciones*. Finalmente, debería haber alguna persona que ejerciera un control de supervisión sobre el sistema físico que ejerce esas decisiones. En cualquier caso, el principal propósito de un SAD es facilitar las actividades cognitivas involucradas en el procesamiento de la información y en las tareas de juicio y elección asociadas.

Asociadas a estas tres etapas, formulación análisis e interpretación, debe estar la capacidad de adquirir, representar y utilizar información o conocimiento, y la posibilidad de implementar el curso de acción alternativo elegido. Todo esto debe llevarse a cabo teniendo en cuenta la particular perspectiva de racionalidad que se usa para la toma de decisiones.

Hay muchas variables que influenciarán la información que se obtiene, o que se debería obtener, en cualquier situación. Estas variables son muy claramente dependientes. Keen y Scott-Morton [171] identifican ocho variables relevantes de información:

1. Fidelidad inherente de la información disponible. Las situaciones de control operativo a menudo tratan con información que relativamente certera y precisa. La información en situaciones de planificación estratégica es a menudo incierta, imprecisa e incompleta.
2. Nivel de detalle que se necesita. Frecuentemente se necesita información muy detallada para decisiones de tipo operativo, y para decisiones estratégicas se desea información muy agregada.
3. Horizonte de tiempo para la información necesaria. Las decisiones operativas se basan típicamente en informaciones sobre un horizonte de tiempo corto, y la naturaleza del control puede cambiar frecuentemente. Por el contrario, las decisiones estratégicas se basan en informaciones y predicciones sobre grandes periodos de tiempo.
4. Frecuencia de uso. Las decisiones estratégicas se toman con poca frecuencia aunque se redefinen muy a menudo. Las decisiones operativas se hacen muy frecuentemente, y pueden cambiarse con mucha facilidad.
5. Fuentes de información internas o externas. Las decisiones operativas a menudo se basan en informaciones que están disponibles internamente en la organización, mientras que las decisiones estratégicas son muy dependientes de fuentes externas a la organización.
6. Ámbito de la información. Generalmente, las decisiones operativas se toman con una base de información de ámbito restringido, relativo a acontecimientos bien definidos internos a la organización. Las decisiones estratégicas se basan en informaciones sobre un ámbito amplio y un gran rango de factores que a menudo no pueden anticiparse antes de tener que tomar la decisión.
7. Cuantificación de la información. En planificación estratégica, la información suele ser de naturaleza cualitativa, al menos inicialmente.

Para decisiones operativas, la información disponible suele estar muy cuantificada.

8. Actualidad de la información. En planificación estratégica, la información suele ser antigua, y a menudo es difícil obtener información actualizada. Para decisiones de control operativo, casi siempre, se necesita información muy actualizada.

De la medida en que un sistema posea la capacidad de ayudar a las personas, o grupos de personas, en la formulación, análisis e interpretación de temas, dependerá que el sistema resultante deba llamarse un Sistema de Gestión de Información (SGI), un Sistema Predictivo de Gestión de Información (SPGI) o un SAD. Se puede ayudar al decisor en cualquiera de estos diferentes niveles, como sugiere la siguiente figura.

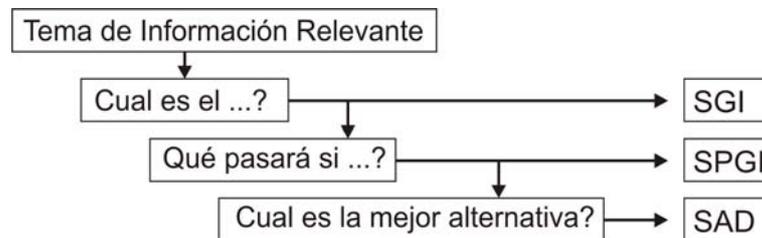


Figura I.5: Niveles de decisión

El que tengamos un SGI, un SPGI o un SAD dependerá del soporte material (tanto software como hardware) con que se provea al decisor. Fundamental a la noción de SAD será la asistencia proporcionada para evaluar la situación, identificar cursos de actuación alternativos, formular la situación de decisión, estructurar y analizar la situación de decisión, y entonces interpretar los resultados del análisis de las alternativas en términos del sistema de valores que posea el decisor.

En un SGI clásico, el usuario introduce una petición sobre un informe concerniente a alguna cuestión, y el SGI suministra ese informe. Cuando el usuario es capaz de plantear cuestiones de tipo “que pasa si”, y el sistema es capaz de responder con un respuesta del tipo “si... entonces”, entonces tendremos un SPGI. En cada caso, hay una especie de formulación del tema, que se acompaña por cierta capacidad de análisis. El SGI clásico solo necesita ser capaz de responder las preguntas con informes. Un tipo SGI atiende de forma prioritaria el procesamiento de datos y el flujo de datos estructurados en el nivel operativo, así como el resumen de informes para el usuario. Los SPGI también incluiría un cierta cantidad adicional de capacidad de análisis, lo que podría requerir un sistema inteligente de preguntas sobre una base de datos, o quizás el simple uso de un modelo macroeconómico o de hojas de cálculo.

Para obtener un SAD, necesitaremos añadir la capacidad de gestión de base de datos al SGI. Pero se necesita mucho más que solo la simple adición de un conjunto de árboles de decisión y de procedimientos para examinar paradigmas basados en el análisis de decisiones. Necesitamos también un sistema que sea

flexible y adaptable a los cambios que requiera el usuario, tales como proporcionar el soporte de los estilos de decisión del decisor. Necesitamos proporcionar soporte analítico en una variedad de situaciones complejas. Muchas situaciones de decisión están fragmentadas porque hay varios decisores, más que uno solo. También puede haber involucrados elementos separadores espaciales y temporales. Además, los gestores tienen muchas más actividades que la toma de decisión, y en muchos casos los SAD deberán poder ayudar a la realización de esas otras tareas. Así el principal objetivo de los SAD es mejorar la efectividad del conocimiento organizativo de los usuarios a través del uso de las tecnologías de la información.

### I.3.3. CONTEXTOS PARA DISEÑAR SAD

Como se ha discutido, un SAD tiene tres componentes importantes:

- El sistema de gestión de la base de datos (SGBD)
- El sistema de gestión de la base de modelos (SGBM)
- Los sistemas de gestión y generación de diálogos (SGGD)

Y un contexto de diseño de SAD apropiado considerará cada una de estas tres componentes, sus interrelaciones y sus interacciones. La siguiente figura ilustra la interconexión de estas tres componentes genéricas y muestra la interacción del decisor con el sistema a través del SGGD.

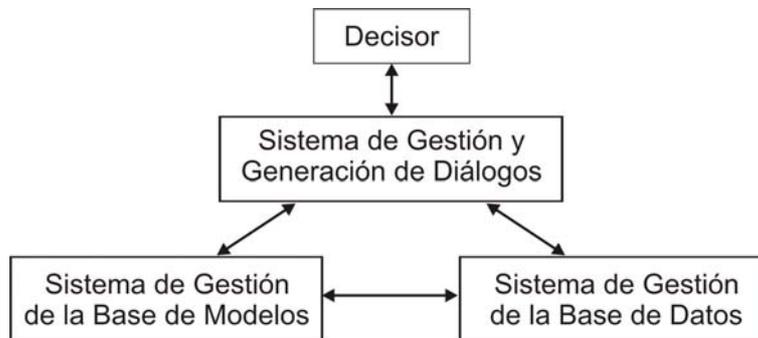


Figura I.6: Componentes del SAD

Sprage y Carlson [295] han introducido también otros tres niveles tecnológicos en los que pueden considerarse los SAD. El primero es el de las herramientas de los SAD en sí mismos. Este nivel contiene los elementos software y hardware, así como los métodos científicos y de investigación operativa necesarios para diseñar un SAD específico. El propósito de estas herramientas de los SAD es diseñar un SAD específicos responsables ante determinadas tareas y situaciones. El segundo nivel es el de los generadores de SAD. El tercer nivel es el del SSD en concreto. El SAD específico puede diseñarse a través del uso de herramientas de SAD solo, también a través del uso de generadores de SAD solamente, o mediante el uso combinado de ellos.

En general el uso de un generador puede resultar muy conveniente, ya que permite al diseñador no tener que ser un especialista completo en el dominio

concreto en que vaya a desarrollarse el SAD. El generador suele entenderse como un software que permita la construcción de SAD, incluyendo la capacidad de realizar preguntas, la elección del lenguaje, el análisis de datos, por ejemplo, estadísticos o financieros, la representación gráfica, etc. La principal ventaja de un generador es que permitirá la construcción rápida de un prototipo. El tercer nivel en el diseño de SAD resulta al añadir a los SAD la capacidad de gestión, lo que a menudo consistirá en dotar al sistema de un interfaz de diálogo. La siguiente figura ilustra los tres niveles del diseño de un SAD:

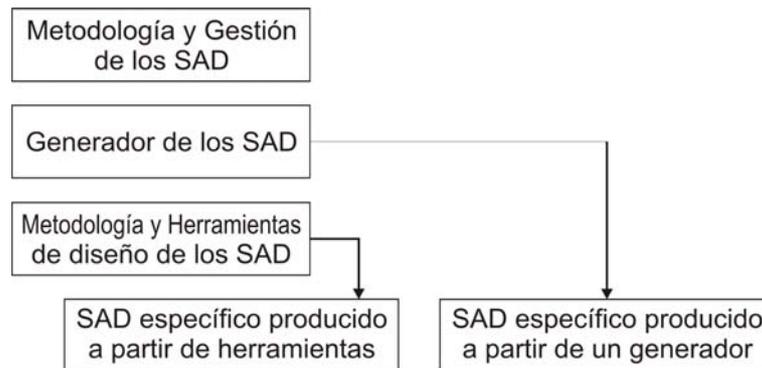


Figura I.7: Niveles de diseño de los SAD

Pero este enfoque de diseño tiene inconvenientes. En particular destacan los problemas que pueden aparecer referentes a especificaciones incompletas, inconsistentes que pueden resultar de ciertas estructuras de gestión pobremente definidas. La siguiente figura refleja una jerarquía encajada de niveles de realización en la ingeniería de sistemas. El parecido entre esta figura y la inmediatamente anterior indica la similitud entre el enfoque de Sprage y Carlson [295], y el enfoque de diseño de ingeniería de sistemas.

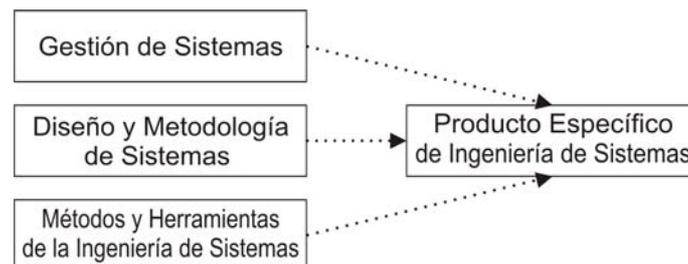


Figura I.8: Ingeniería de Sistemas

Para nuestros fines podemos definir Ingeniería de Sistemas como la necesidad de identificación, de especificación arquitectónica, diseño, producción y mantenimiento de sistemas funcionales, fiables y exactos en términos de costo y de satisfacción de restricciones, con lo que tiene sentido el término Ingeniería de los SAD. Junto con esto, y de cara a perfilar más lo que entendemos por el diseño de la ingeniería de los SAD, daremos tres definiciones más (estructural, funcional y de orientación) de la ingeniería de sistemas:

1. *Estructura*. La ingeniería de sistemas es la gestión tecnológica para ayudar al cliente en la formulación, análisis e interpretación de los

impactos de las políticas propuestas, los controles o el sistema completo, sobre las perspectivas necesarias, las perspectivas institucionales, y las perspectivas de valor referentes al tema en consideración.

2. *Función.* La ingeniería de sistemas es una combinación apropiada de teorías y herramientas, realizada a través del uso de una metodología conveniente y unos procedimientos de gestión de sistemas, en un sentido útil y apropiado para la resolución de problemas del mundo real, a menudo de gran escala y gran ámbito.
3. *Propósito.* El propósito de la ingeniería de sistemas es la organización de la información y el conocimiento que ayuda a los clientes que desean desarrollar políticas de gestión, dirección, control y regulación de actividades relativas a la planificación anticipada, el desarrollo, la producción y la operación de sistemas globales para mantener una integridad en lo que concierne a realizaciones prácticas y fiabilidad.

Cada una de estas definiciones es importante en un sentido. La definición funcional, aplicada a la ingeniería de SAD, nos dice que estaremos interesados en las diferentes técnicas y herramientas que nos capaciten para diseñar SAD. A menudo, estas provendrán del campo de la Teoría de Sistemas y la I.O., o quizás serán del campo de las Ciencias de la Computación. También dice que nos interesará la combinación de estas herramientas. Utilizaremos el término Metodología de Diseño de Sistemas para notar el esfuerzo de obtener una combinación ideal de herramientas de diseño. Finalmente la definición dice que esto habrá de hacerse en una forma apropiada. Usaremos el término Gestión de Sistemas para referirnos a las tareas cognitivas necesarias para producir un proceso útil a partir de un estudio del diseño y de la metodología de sistemas. El producto de todo esto es una apropiada combinación de ciencia de sistemas y de métodos I.O. que se usa para resolver problemas. Cada uno de estos tres niveles funcionales, como ilustra la anterior Figura I.8 es importante y ninguno de ellos puede evitarse.

Pero también podemos dar una definición estructural, funcional y de orientación de un SAD. La definición estructural nos diría que estaremos interesados con un contexto para la resolución de situaciones de decisión que, desde una perspectiva formal al menos, consiste en tres etapas principales.

- La formulación del tema motivo del soporte de decisión
- El análisis del tema motivo del soporte de decisión
- La interpretación del tema motivo del soporte de decisión

Consecuentemente, es independiente de la forma en que se caracterice el proceso de diseño del SAD, e independientemente del tipo de proceso o sistema que se esté diseñando, todas las caracterizaciones supondrán:

- La formulación del problema de diseño, donde las necesidades y objetivos de los usuarios tendrán que ser identificadas, y habrá que generar e identificar alternativas de diseño potencialmente aceptables.

- El análisis de los diseños alternativos, evaluando los impactos de las diferentes opciones de diseño, y
- La interpretación y selección, comparando las opciones de diseño por medio de una evolución de los impactos de los diseños alternativos. Entonces se seleccionará la alternativa más aceptable para ser implementada.

El diseño y desarrollo de un SAD se corresponde con un patrón que puede describirse brevemente como sigue. El diseño inicial se lleva a cabo de una forma preliminar para obtener diversos conceptos que podrían funcionar. Las diversas opciones se identifican y se someten a una evaluación preliminar para eliminar las alternativas claramente inaceptables. Las alternativas supervivientes se someten entonces a un esfuerzo de diseño más detallado, obteniendo arquitecturas o especificaciones más completas. El resultado de esto es una decisión, y un plan de acción asociado, que puede estar sometido a un detallado testeo de diseño, y una implementación operativa y el testeo del sistema implementado. Este diseño del sistema puede modificarse como resultado de esta evaluación, lo que llevaría a un sistema mejorado final.

Todo esto nos conduce a una metodología de diseño de sistemas, que naturalmente también es aplicable al diseño de los SAD, y que consiste de las siguientes fases:

1. Identificación de requerimientos y necesidades
2. Diseño conceptual preliminar
3. Diseño lógico y especificaciones arquitectónicas
4. Diseño detallado y testeo
5. Implementación operativa
6. Testeo operativo, evaluación y modificación, y
7. Desarrollo operativo y mantenimiento.

#### **1.3.4. SISTEMAS DE GESTIÓN DE BASES DE DATOS (SGBD)**

El SGBD es una de las tres componentes fundamentales de un SAD. Un SGBD apropiado debe ser capaz de trabajar con datos que sean internos a la organización y datos externos a la misma. Casi en cualquier caso en que haya múltiples decisores, habrá necesidad de manejar bases de datos locales e interlocales. Algunas de las características deseables de un SGBD son las de la capacidad de tratar con una gran variedad de estructuras de datos que permitan el manejo de datos probabilísticas, incompletos e imprecisos. El SGBD también debe ser capaz de informar al usuario del SAD de los tipos de datos disponibles, y como tener acceso a ellos.

Para construir una base de datos, primero debemos identificar el modelo de datos. El modelo de datos es una colección de estructuras de datos, y reglas de integridad que se usan para restringir o definir valores permisibles para los datos. Al menos hay cinco modelos que pueden usarse para representar los datos. Los más elementales, son los modelos de registros individuales. El modelo relacional es una potente generalización del modelo de registros. Una relación es una estructura de datos fundamental en el modelo relacional, y puede haber un gran número de campos en cualquier relación dada. El modelo relacional dispone conjuntos de operaciones matemáticas en registros en términos de inserción de nuevos registros; actualizando campos sobre los registros ya existentes; borrando antiguos registros; creando relaciones que pueden estar contenidas en otros registros; uniendo o combinando dos o más relaciones basadas en campos comunes; seleccionando registros en virtud de contener ciertas relaciones especificadas; y proyectando, como si de una selección se tratara, un subconjunto de campos existentes en una relación.

La jerarquía, o el modelo de árbol de datos, es una representación de los datos relativamente eficientes. En un modelo jerárquico, la estructura representa la información que está contenida en los campos de un registro relacional. En un modelo jerárquico, habrá ciertos registros que deben existir antes de que existan otros, ya que cualquier estructura de datos debe tener un registro raíz. Debido a este aspecto estructurado, será necesario repetir alguno de los datos que se necesitan almacenar solo una vez en un modelo relacional. El modelo en red es una generalización del modelo jerárquico en el que hay conexiones entre registros que permiten a un registro dado participar en diversas relaciones. A menudo suelen aparecer importantes problemas asociados a las inserciones, borrados y actualizaciones tanto en los modelos jerárquicos como en los de red, debido a la necesidad de mantener una consistencia en la base de datos. Esto no se produce en el modelo relacional, ya que un mismo dato nunca es introducido más de una vez. También existe una complejidad adicional en temas de búsqueda, ya que una búsqueda puede comenzar en cualquier parte de la red (supuesta esta estructura). Sin embargo las búsquedas suelen ser más eficientes que en modelo relacional.

Debido a la potencial necesidad de acomodar capacidades de tipo sistema experto en un SAD, es deseable considerar un modelo de reglas de producción como un quinto modelo de datos. Esto permitirá realizar inferencias. Así esta es una forma especialmente deseable de modelo de dato cuando deseamos hacer gestiones de tipo predictivo. Las repuestas de tipo “Si, Entonces” para preguntas del tipo “que pasa si”, es especialmente natural en estas representación.

### **1.3.5. SISTEMAS DE GESTIÓN DE BASE DE MODELOS (SGBM)**

El deseo de poder contar con cierto tipo de capacidades en un SAD nos lleva a tener que discutir los sistemas de gestión de bases de modelos. Es a través del uso de los SGBM que somos capaces de implementar la posibilidad de realizar análisis sofisticados y capacidades de interpretación en un SAD. La

característica más importante de un SGBM es que habilita al decisor para poder explorar la situación de decisión a través del uso de la base de datos, mediante una base de modelos de procedimientos algorítmicos y protocolos asociados de gestión de los modelos. Esto puede ocurrir mediante el uso de sentencias de modelización, en algún lenguaje procedimental o no procedimental; mediante el uso de modelos subrutinas, tales como los paquetes de Programación Matemática, que se llaman por medio de funciones de gestión; y a través del uso de modelos abstractos de datos. Este último enfoque es muy parecido al enfoque correspondiente a los sistemas expertos en el que existían elementos, ecuaciones, y procedimientos de solución que, juntos, confirman un motor de inferencia. Las ventajas de este enfoque incluyen la facilidad de actualizar y usar los modelos con fines explicativos.

Típicamente será deseable permitir el uso de los diversos modelos para que se puedan acomodar mejor y más flexiblemente los deseos del decisor. El tema de la gestión de la base de modelos es nuevo, y muy importante, para el desarrollo de SAD. Entre los nuevos desarrollos en esta área están el uso de sistemas expertos para construir rápidamente modelos, el uso de técnicas heurísticas de búsqueda para la selección e integración de modelos en el SAD, y el desarrollo de enfoques para la interpretación de los resultados del análisis efectuado con el modelo usado.

El SGBM debería proporcionar flexibilidad al sistema, previa petición del usuario, a través de una variedad de modelos pre-escritos que se hayan demostrado útiles en la práctica con anterioridad, tales como Programación Lineal y modelos de análisis de decisiones multiatributo, y procedimientos para el uso de estos modelos. También debería permitir el desarrollo de modelos contruidos por el usuario, así como de heurísticas que se hubieran desarrollado a partir de modelos pre-establecidos. Así mismo, la posibilidad de realizar análisis de sensibilidad sobre los resultados que se obtengan, y ejecutar modelos con una amplia gama de datos de cara a poder contestar preguntas del tipo “que pasa si”.

### **II.3.6. SISTEMAS DE GESTIÓN Y DE GENERACIÓN DE DIÁLOGOS (SGGD)**

La parte del SAD correspondiente al sistema de gestión y de generación de diálogos está diseñada para entender representaciones del conocimiento, y satisfacer los requerimientos de control e interfaz. El SGGD es el responsable de la presentación de la información output, así como de admitir y transmitir los input, del usuario. Desde este punto de vista el SGGD es un aspecto clave de cualquier SAD puesto que puede entenderse que son los sentidos del SAD.

Existe una amplia variedad de diálogos. Estos están inherentemente relacionados con las formas de representación que se usen en el SGBD y en el SGBM. Algunos de los formatos que puede usarse como base para el diálogo con los menús, comandos lenguajes o interfaces de manipulación directa. Generalmente, deberían usarse varios de estos formatos, ya que el usuario del SAD podría desear cambiar de formato según la naturaleza del tema a tratar, y

la familiaridad experimental que posea. El SGGD debería ser lo suficientemente flexible para permitir la revisión y el análisis de sensibilidad de juicios ya celebrados, y ser capaz de proporcionar juicios parciales basados en informaciones incompletas. Naturalmente, el SGGD deberá ser amigable, proporcionando tantas funciones de ayuda como se pueda. Es necesario evitar, a cualquier costo, un sistema que destruya perspectivas imaginativas, pero sin embargo potenciar aquellos que las favorezcan. En resumen, un SGGD es esencial para un SAD si este va a ser usado por personas, ya que proporcionar un sistema aceptable es, naturalmente, el objetivo principal del diseño de sistemas.

### II.3.7. DISEÑO Y EVALUACIÓN DE SAD

Para la preparación de un SAD es necesario tener en cuenta una serie de comportamientos muy importantes. El usuario debe estar involucrado en el proceso de diseño, el soporte de gestión para el diseño y la viabilidad de actividades de entrenamiento para el usuario, solo son unos cuantos de los muchos requisitos a tener en consideración para una implementación exitosa del sistema. Es especialmente importante que los usuarios potenciales no entiendan el sistema como difícil de aprender a usarlo, costoso en el tiempo, productor de respuestas no acertadas, incompletas, etc. Normalmente lo más atractivo para un usuario será que el sistema en uso se acerque lo más posible a su forma de trabajar por lo que el diseño y su evaluación serán usuario-dependientes.

### II.3.8. CLASIFICACIÓN DE LOS SAD

Existen muchas maneras de clasificar los SAD, y el tipo de SAD condiciona en buena medida su diseño y estructura. Entre los muchos tipos posibles de SAD, se incluyen, a modo ilustrativo, los siguientes [310]:

- **SAD Orientado a Textos (Text-Oriented DSS):** Los datos, el conocimiento y cualquier otro tipo de información suelen encontrarse en un formato texto. Los textos pueden ser creados, modificados y recuperados cuando sea necesario, y las aplicaciones para SAD de este tipo pueden incorporar agentes inteligentes y tecnologías web como hipertexto y documentos con imágenes.
- **SAD Orientado a Bases de datos (Database-Oriented DSS):** Los primeros SAD usaban sistemas de base de datos sencillos o distintas configuraciones de bases de datos relacionales. Un SAD orientado a bases de datos contempla, además, capacidades potentes de consulta y de generación de informes.
- **SAD Orientado a resoluciones (Solver-Oriented DSS):** Un SAD orientado a resoluciones se basa en un algoritmo o procedimiento desarrollado como un programa informático para resolver un tipo particular de problema, como es el caso que nos ocupa en la presente tesis doctoral. Un tipo particularmente simple de estos SAD son los SAD Orientados a Hojas de Cálculo (Spreadsheet-Oriented DSS) que utilizan estos algoritmos

(llamados generalmente funciones en este caso) como los incluidos en programas como Microsoft Excel, que junto a sus capacidades propias de base de datos o la posibilidad de conexión a base de datos externas, puede usarse como base para construir este tipo de SAD. Por otro lado, los SAD Basados en Optimización (Optimization-Based DSS) pueden verse también como un tipo de estos SAD o como un tipo más general con tres etapas: Formulación, Solución y Análisis.

- **SAD Orientado a Reglas (Rule-Oriented DSS):** Un SAD orientado a reglas incluye reglas tanto de procedimiento como de inferencia (razonamiento), normalmente en forma de Sistema Experto (Expert System), que no es más que un sistema que emula el comportamiento de los expertos de un dominio concreto, para conseguir una mejor calidad y rapidez en las respuestas, aumentando la productividad.
- **SAD Compuestos (Compound DSS):** Un SAD compuesto es un híbrido que incluye dos o más de los tipos de SAD anteriores.
- **SAD Inteligentes (Intelligent DSS):** incluye, por ejemplo, SAD que se adaptan al usuario, SAD Grupales (para el soporte a decisiones en grupo), SAD Institucionales (que se aplican en tomas de decisiones de naturaleza recurrente),...

## ***BLOQUE II. METODOLOGÍA***



## CAPÍTULO II.1

# Soft Computing. Modelado Lingüístico Difuso

---

### II.1.1. INTRODUCCIÓN

Desde que Zadeh [354] introdujo el concepto de conjunto difuso y consecuentemente se extendió al concepto de variables lingüísticas la popularidad y el uso de la lógica difusa ha sido extraordinario. Estamos particularmente interesados en el papel de las variables lingüísticas, y sus términos asociados. En la presente tesis doctoral usaremos números difusos triangulares, para la modelización de estas variables lingüísticas, los cuales son utilizados en la toma de decisiones multicriterio.

Por ello en este capítulo se describen los elementos principales de la Soft Computing, en particular la lógica difusa y el Modelado Lingüístico Difuso, dado que serán utilizados posteriormente en el proceso de Análisis de un Problema de Decisión y para la creación del SAD ejemplo de aplicación en nuestro caso.

### II.1.2. SOFT COMPUTING

Para entender la aparición de la Soft Computing hay que resaltar, en primer lugar, que la necesidad de encontrar la solución óptima de un problema correctamente planteado, o la mejor solución entre las disponibles, justifica que se construyan y estudien teorías, y se propagan metodologías adecuadas en el campo científico en el que surge la cuestión que se ha de resolver. Desde un punto de vista más concreto, pero aún más general, una importante clase de problemas son los conocidos con el nombre de problemas de optimización, habitualmente asociados a tener que encontrar el máximo o el mínimo valor que una determinada función puede alcanzar en un cierto conjunto previamente especificado. Todo lo relativo a estos problemas se enmarcan dentro del cuerpo doctrinal denominado Programación Matemática, que incluye una enorme variedad de situaciones, según que se consideren casos lineales, no lineales, aleatoriedad, un solo decisor o varios decisores, etc. Entre todos los modelos que

se incluyen en la Programación Matemática, el más y mejor estudiado, así como el que ha probado tener unas repercusiones prácticas más importantes, es el correspondiente al caso lineal uni-objetivo, tema del que se ocupa la Programación Lineal. Los métodos y modelos de la Programación Lineal tienen relevantes aplicaciones en las diferentes áreas de las Ingenierías, la Economía, las Matemáticas, la Investigación Operativa, la Inteligencia Artificial y demás disciplinas más o menos relacionadas con la optimización, y construyen un sustrato teórico más que adecuado para abordar de un modo elegante y eficiente situaciones muy complejas.

Cuando en los problemas de Programación Matemática se consideran elementos de naturaleza difusa, surgen los métodos de optimización difusos, quizá una de las áreas más fructíferas en el ámbito fuzzy, tanto desde el punto de vista teórico como aplicado. Aunque la optimización difusa recoge métodos y modelos que dan solución a una enorme variedad de situaciones prácticas reales, no puede dar respuestas en todos los escenarios posibles, del mismo modo que le ocurre a la Programación Matemática convencional. Y no puede hacerlo por una sencilla razón, y es que hay problemas que siendo planteables en términos propios de ese campo, no son resolubles con sus técnicas.

La facilidad de resolver problemas reales de dimensión cada vez mayor, gracias a la mayor potencia y el menor costo de los computadores, la imposibilidad de conocer en todos los casos las soluciones exactas que les corresponde a esos problemas, y la necesidad de dar respuestas a las situaciones prácticas contempladas en multitud de casos (problemas de organización de las tareas que ha de efectuar un robot, de identificación de itinerarios, de clasificación y ubicación de recursos,...; en definitiva, problemas combinatorios), han motivado que los algoritmos sean empleados cada vez más como valiosas herramientas capaces de proporcionar soluciones donde los algoritmos exactos no son capaces de encontrarlas. Así en los últimos años ha surgido un catálogo de técnicas diversas, animadas por el principio de que “es mejor satisfacer que optimizar”, o lo que es lo mismo, que antes de no poder dar la solución óptima a un problema, es mejor dar una solución que satisfaga al usuario en algún sentido que previamente habrá especificado.

Desde que en 1965 Lofti A. Zadeh [353] introdujera el concepto de conjunto difuso (fuzzy set) permitiendo la pertenencia de un elemento a un conjunto de forma gradual, y no de manera absoluta como establece la teoría conjuntista clásica, es decir, admitiendo pertenencias valoradas en el intervalo  $[0,1]$  en lugar de en el conjunto  $\{0,1\}$ , las aplicaciones y desarrollos basados en este sencillo concepto han evolucionado de tal modo que, hoy en día, es prácticamente imposible calcular el volumen de negocio que generan en todo el mundo, pudiendo encontrar productos cuyo funcionamiento está directamente basado en dicho concepto desde los más usuales electrodomésticos (lavadoras, microondas, cámaras fotográficas,...) hasta los más sofisticados sistemas (frenado de trenes, control de hornos, navegación automática,...).

Inicialmente, los conceptos que maneja la Soft Computing eran tratados de forma aislada, indicando el empleo de metodologías fuzzy. La idea de establecer el área de Soft Computing no surgió hasta 1990 [361] y fue ya en 1994 [358] cuando Zadeh propuso una primera definición de Soft Computing, estableciéndola en los siguientes términos:

“Básicamente Soft Computing no es un cuerpo homogéneo de conceptos y técnicas. Más bien es una mezcla de distintos métodos que de una forma u otra cooperan desde sus fundamentos. En este sentido, el principal objetivo de la Soft Computing es aprovechar la tolerancia que conlleva la imprecisión y la incertidumbre, para conseguir manejabilidad, robustez y soluciones de bajo coste. Los principales ingredientes del Soft Computing son la Lógica Fuzzy, la Neuro-Computación y el Razonamiento probabilístico, incluyendo en este último los Algoritmos Genéticos, las Redes de Creencia, los Sistemas Caóticos y algunas partes de la Teoría de Aprendizaje. En esa asociación de Lógica Fuzzy, Neurocomputación y Razonamiento Probabilístico la Lógica Fuzzy se ocupa principalmente de la imprecisión y el Razonamiento Aproximado; la Neurocomputación del aprendizaje, y el Razonamiento Probabilístico de la incertidumbre y la propagación de las creencias”

Quedaba así claro que la Soft Computing no estaba definida precisamente, sino que en una primera aproximación se define por extensión, por medio de distintos conceptos y técnicas que intentan superar las dificultades que surgen en los problemas reales que se dan en el mundo que es impreciso, incierto y difícil de categorizar.

Algunos intentos posteriores de ajustar más esta definición de Soft Computing no fueron muy fructíferos. Así por ejemplo Li y otros [215], a la vista de la dificultad de dar una nueva definición del campo de una manera exacta y consensuada, y de mayor sencillez de hacerlo por medio de sus características, proponen la siguiente definición de trabajo, que vuelve a ser de tipo descriptivo:

“Cualquier proceso de computación que expresamente incluya imprecisión en los cálculos en uno o más niveles, y que permita cambiar (disminuir) la granularidad del problema o suavizar los objetivos de optimización en cualquier etapa, se define como perteneciente al campo de la Soft Computing.”

Más recientemente, Verdegay, Yager y Bonissone [315] han presentado una definición más precisa e ilustrativa de lo que es la Soft Computing en la actualidad, en los siguientes términos:

“El punto de vista que aquí consideramos es otra forma de definir la Soft Computing, por medio de la cual se la considera como la antítesis de los que podríamos llamar *Hard Computing*. Este punto es consistente con el presentado en [357;358]. La Soft Computing puede, por tanto, verse como una serie de técnicas y métodos con las que manejar las situaciones prácticas reales en la misma manera que los humanos tratan con ellas, es

decir, en base a la inteligencia, sentido común, consideración de analogías, aproximaciones, etc. En este sentido, Soft Computing es una familia de métodos de resolución de problemas encabezados por el Razonamiento Aproximado y los Métodos de Aproximación Funcional y de Optimización, incluyendo los de búsqueda. Soft Computing está, por tanto, en la base teórica del área de los Sistemas Inteligentes”.

### II.1.2.1. LOGICA DIFUSA

La lógica difusa es una de las propuestas surgida para la formalización del razonamiento aproximado, que intenta manejar el conocimiento propio del “sentido común” (alto, pocos, mucho, caro, etc.) Se trata de una generalización de la lógica booleana (lógica clásica, de verdadero o falso) propuesta, como ya se ha dicho, por Zadeh en 1965 [353]. Consistente en una extensión de la lógica clásica con objeto de permitir manejar el concepto de verdades parciales situadas entre el “completamente verdadero” y el “completamente falso”.

En la actualidad, la teoría de los conjuntos difusos engloba un corpus bien organizado de nociones básicas incluyendo operaciones de agregación, una teoría generalizada de las relaciones, medidas específicas de cantidad de la información y un sistema de cálculo para los números difusos. Tras el concepto de lógica difusa se encuentra la teoría de la posibilidad y los sistemas basados en reglas difusas, que constituyen una herramienta poderosa y versátil tanto para el modelado verbal como el numérico.

A continuación, haremos una pequeña revisión de los conceptos básicos de la Teoría de Conjuntos Difusos. Para una revisión más detallada, véase [182]

#### Definición de Conjunto Difuso

La noción de conjunto refleja la idea de agrupar colecciones de objetos que cumplen una o varias propiedades que caracterizan a dicho conjunto. Una propiedad puede ser considerada como una función que a cada elemento de universo de discurso  $U$  le asigna un valor en el conjunto  $\{0,1\}$ , de forma que si el elemento pertenece al conjunto, es decir, cumple la propiedad, se le asigna el valor 1 o, en caso contrario, el valor 0. De esta forma, los conjuntos introducen una noción de dicotomía que, en esencia, es una clasificación binaria: o se acepta o se rechaza la pertenencia de un objeto a una categoría determinada. Esta decisión de aceptar o rechazar la pertenencia de un objeto a una categoría determinada se expresa mediante una función característica, según las propiedades que posean los objetos del conjunto.

**Definición II.1:** Sea  $A$  un conjunto en el universo de discurso  $U$ , la función característica asociada a  $A$ ,  $A(u)$ ,  $u \in U$ , se define como:

$$A(u) = \begin{cases} 1, & \text{si } u \in A \\ 0, & \text{si } u \notin A \end{cases}$$

La función  $A : U \rightarrow \{0,1\}$  introduce una restricción, con un límite bien definido, sobre los objetos del universo de discurso  $U$  pueden ser asignados al conjunto  $A$ ,

La lógica difusa se fundamenta en el concepto de conjunto difuso [353], que refleja el requerimiento anterior y admite valores intermedios en la función característica, la cual se denomina *función de pertenencia*.

Esta relajación permite una interpretación más realista de la información, puesto que la mayoría de las categorías que describen los objetos del mundo real no tienen unos límites claros y bien definidos. Por ejemplo, ordenador *potente*, *buen* sabor, coche *veloz*, etc. (las palabras en itálica identifican fuentes de imprecisión). Si un objeto pertenece a una categoría con un grado de pertenencia que puede ser expresado por un número real en el intervalo  $[0,1]$ , cuanto más cercano a 1 sea el grado, indicará mayor pertenencia a esa categoría determinada, y cuanto más cercano a 0, indicará menor pertenencia a dicha categoría.

Por tanto, un conjunto difuso puede definirse como una colección de objetos con valores de pertenencia entre 0 (exclusión total) y 1 (pertenencia total). Los valores de pertenencia expresan los grados con los que cada objeto es compatible con las propiedades o características distintivas de la colección. Formalmente, podemos definir un conjunto difuso como sigue [353]:

**Definición II.2:** Un conjunto  $\tilde{A}$  sobre un dominio o universo de discurso  $U$  está caracterizado por una función de pertenencia

$$\mu_{\tilde{A}} : U \rightarrow [0,1]$$

que asocia a cada elemento  $u$ ,  $u \in U$ , el grado con que pertenece al conjunto difuso  $\tilde{A}$ , asignándole un valor en el intervalo  $[0,1]$

Así, un difuso  $\tilde{A}$  en  $U$  puede representarse como un conjunto de pares ordenados de un elemento genérico  $u$ ,  $u \in U$ , y su grado de pertenencia  $\mu_{\tilde{A}}(u)$ :

$$\tilde{A} = \{(u, \mu_{\tilde{A}}(u)) / u \in U, \mu_{\tilde{A}}(u) \in [0,1]\}$$

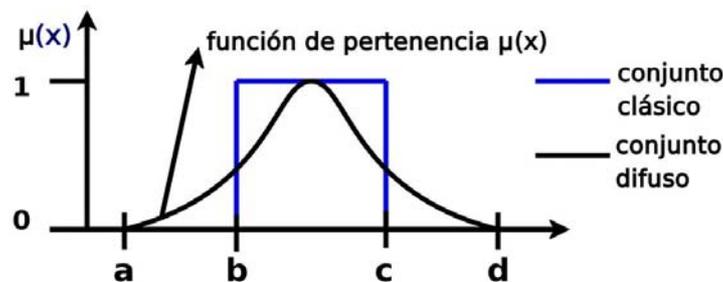


Figura II.1: Ejemplo de función de pertenencia de un conjunto difuso

Claramente, un conjunto difuso es una generalización del concepto de conjunto cuya función de pertenencia toma solo los valores [71].

Puede verse un ejemplo de función de pertenencia en la Figura II.1, junto a la comparación de lo que podría ser el equivalente en conjuntos clásicos del mismo “concepto”.

**Ejemplo II.1:** Consideremos el concepto *persona joven* en un contexto donde se clasifica a las personas atendiendo exclusivamente a la edad, la cual oscila en el intervalo  $P=[1,110]$  años. Asumiendo que nuestra percepción de una persona joven es alguien que tiene una edad no mayor a 20 años, entonces según la teoría clásica el conjunto difuso se define de la siguiente manera:

$$joven = \{x \in P \mid edad(x) \leq 20\}$$

Sobre algún dominio  $P$  de todas las personas y usando la función *edad* que retorna la edad en años de alguna persona  $x \in P$ . Además podemos definir la función característica:

$$m_{joven}(x) = \begin{cases} 1 & edad(x) \leq 20 \\ 0 & edad(x) > 20 \end{cases}$$

El cual asigna a los elementos de  $P$  el valor de 1 cuando un elemento pertenece al conjunto de las personas jóvenes, y 0 si no. Esta función característica puede ser vista como una *función de pertenencia* para el conjunto *joven*, definiendo el conjunto joven en  $P$ .

Sin embargo, una persona que tenga un poco más de 20 años reclamará que se considera una persona joven con un alto grado de pertenencia, por lo tanto la definición del conjunto *joven* usando una frontera tan marcada no es la manera más apropiada. La idea fundamental que existe detrás de la teoría de conjuntos difusos es una visión diferente de la noción de pertenencia y consiste en que los elementos pueden pertenecer a más de un conjunto con cierto grado de pertenencia. En nuestro ejemplo, podemos decir que una persona de 21 años pertenece al conjunto de *joven* pero con un grado de 0,9. Por lo tanto la función de pertenencia podría ser:

$$\mu_{joven}(x) = \begin{cases} 1 & edad(x) \leq 20 \\ 1 - \frac{edad(x) - 20}{10} & 20 < edad(x) \leq 30 \\ 0 & edad(x) > 30 \end{cases}$$

Ahora el conjunto joven contiene a personas entre 20 y 30 años con un grado de pertenencia que decrece linealmente (ver Figura II.2).

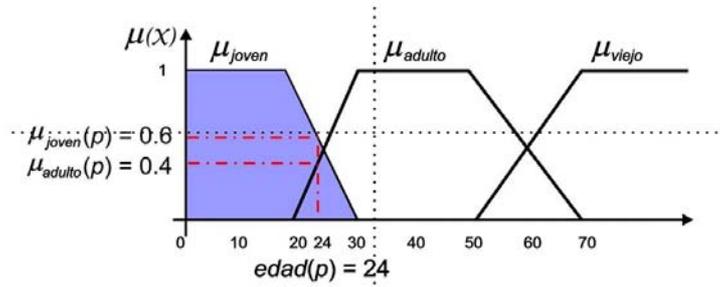


Figura II.2: Variables lingüísticas de la edad con tres conjuntos difusos, y el grado de pertenencia para una cierta edad  $p$

### Conceptos básicos sobre conjuntos difusos

A continuación introducimos otros conceptos básicos a la hora de trabajar con conjuntos difusos como son: el *soporte*, el *núcleo*, la *altura*, el  $\alpha$ -*corte* y el *conjunto de niveles* de un conjunto difuso.

**Definición II.3:** El soporte de un conjunto  $\tilde{A}$  en el universo  $U$ ,  $Soporte(\tilde{A})$ , se define como el conjunto formado por todos los elementos de  $U$  cuyo grado de pertenencia a  $\tilde{A}$  sea mayor que 0.

$$Soporte(\tilde{A}) = \{u \in U \mid \mu_{\tilde{A}}(u) > 0\}$$

Si esta definición la restringimos a aquellos elementos del universo de discurso  $U$  con grado de pertenencia igual a 1, tendríamos el núcleo del conjunto difuso.

**Definición II.4:** El núcleo de un conjunto difuso  $\tilde{A}$ ,  $Núcleo(\tilde{A})$ , se define como el conjunto de todos los elementos de  $U$  cuyo grado de pertenencia a  $\tilde{A}$  es igual a 1

$$Núcleo(\tilde{A}) = \{u \in U \mid \mu_{\tilde{A}}(u) = 1\}$$

**Definición II.5:** La altura de un conjunto difuso  $\tilde{A}$ ,  $Altura(\tilde{A})$ , se define como el mayor grado de pertenencia de todos los elementos de dicho conjunto.

$$Altura(\tilde{A}) = \mathbf{max} \{ \mu_{\tilde{A}}(u) \mid u \in U \}$$

En muchas ocasiones, puede ser interesante conocer no solo los elementos que pertenecen en algún grado al conjunto difuso, sino también conocer el conjunto de aquellos elementos que lo hacen con un valor al menos igual o mayor que un umbral determinado  $\alpha$ . Estos conjuntos se denominan  $\alpha$ -cortes.

**Definición II.6:** El  $\alpha$ -corte de un conjunto difuso  $\tilde{A}$ ,  $\tilde{A}_\alpha$ , se define como el conjunto formado por todos los elementos del universo de discurso  $U$  cuyos grados de pertenencia en  $\tilde{A}$  son mayores o iguales que el valor de corte  $\alpha \in [0, 1]$ .

$$\tilde{A}_\alpha = \{u \in U \mid \mu_{\tilde{A}}(u) \geq \alpha\}$$

### Tipos de funciones de pertenencia

En principio, cualquier función  $\mu_{\tilde{A}} : U \rightarrow [0,1]$  describe una función de pertenencia asociada a un conjunto difuso  $\tilde{A}$  que depende no solo del concepto que representa, sino también del contexto en el que se usa. Las gráficas de las funciones pueden tener diferentes representaciones o formas y pueden tener algunas propiedades específicas como, por ejemplo, continuidad.

Los conjuntos difusos suelen representarse con familias de funciones paramétricas. Las más comunes con las siguientes:

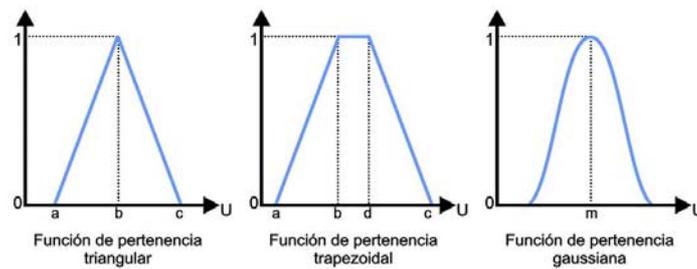


Figura II.3: Representación gráfica de las funciones de pertenencia triangular, trapezoidal y gaussiana.

#### 5. Función Triangular:

$$\mu_{\tilde{A}}(u) = \begin{cases} 0 & \text{si } u \leq a \\ \frac{u-a}{b-a} & \text{si } u \in [a, b] \\ \frac{c-u}{c-b} & \text{si } u \in [b, c] \\ 0 & \text{si } u \geq c \end{cases}$$

donde  $b$  es el punto modal de la función triangular y  $a$  y  $c$  los límites inferior y superior respectivamente para los valores no nulos de  $\mu_{\tilde{A}}(u)$ .

#### 6. Función trapezoidal:

$$\mu_{\tilde{A}}(u) = \begin{cases} 0 & \text{si } u \leq a \\ \frac{u-a}{b-a} & \text{si } u \in [a, b] \\ 1 & \text{si } u \in [b, d] \\ \frac{c-u}{c-b} & \text{si } u \in [d, c] \\ 0 & \text{si } u \geq c \end{cases}$$

donde  $b$  y  $d$  indican el intervalo donde la función de pertenencia vale 1 y  $a$  y  $c$  los límites izquierdo y derecho del dominio de definición de la función de pertenencia trapezoidal.

7. *Función Gaussiana:*

$$A(u) = e^{-k(u-m)^2}$$

donde  $k > 0$  y  $m$  es el punto modal

La representación gráfica de cada una de estas funciones de pertenencia puede verse en la figura II.3.

### Números difusos

Entre los distintos tipos de conjuntos difusos, tienen especial significación aquellos que están definidos sobre el conjunto de los números reales,  $\mathfrak{R}$ .

$$\tilde{A} : \mathfrak{R} \rightarrow [0,1]$$

Bajo ciertas condiciones, estos conjuntos difusos pueden ser vistos como *números difusos* o *intervalos difusos*, definiéndose el concepto de número difuso como [354-356]

**Definición II.7:** Un número difuso  $\tilde{A}$  es un subconjunto de  $\mathfrak{R}$  que verifica las siguientes propiedades:

8. La función de pertenencia es convexa,

$$\forall x, y \in \mathfrak{R}, \forall z \in [0,1], \mu_{\tilde{A}}(z) \geq \min\{\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{A}}(y)\}.$$

9. Para cualquier  $\alpha \in (0,1]$ ,  $\tilde{A}_\alpha$  debe ser un intervalo cerrado.

10. El soporte de  $\tilde{A}$  debe ser finito.

11.  $\tilde{A}$  están normalizado,

$$\sup_x \mu_{\tilde{A}}(x) = 1.$$

Casos particulares de números difusos [182]:

- Los números reales (Figura II.4a).
- Intervalos de números reales (Figura II.4b).
- Valores aproximados (Figura II.4c).
- Intervalos aproximados o difusos (Figura II.4d).

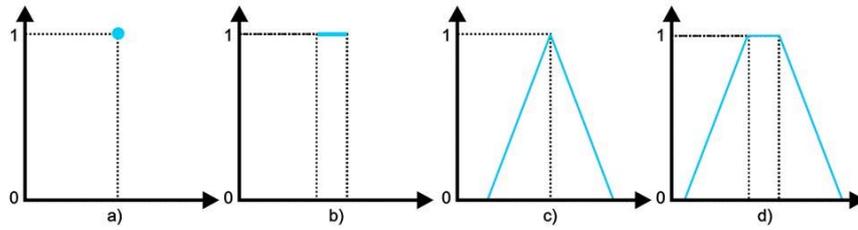


Figura II.4: Ejemplo de números difusos

En la presente tesis doctoral vamos a trabajar con números difusos triangulares que definiremos de la siguiente manera:

**Definición II.8:** Un número real difuso  $\tilde{A}$  se describe como un subconjunto difuso de la recta real  $\mathfrak{R}$  por medio de una función de pertenencia  $f_A$  que tiene las siguientes propiedades.

1.  $f_A(x)$  es una aplicación continua de  $\mathfrak{R}$  en el intervalo cerrado  $[0,1]$ ,  $0 < w < 1$ ;
2.  $f_A(x) = 0$ , para todo  $x \in (-\infty, a)$ ;
3.  $f_A(x)$  es estrictamente creciente en  $[a, b]$ ;
4.  $f_A(x) = 1$ , para todo  $x \in [b, c]$ ;
5.  $f_A(x)$  es estrictamente decreciente en  $[c, d]$ ;
6.  $f_A(x) = 0$ , para todo  $x \in (d, \infty)$ ;

donde  $a, b, c$ , y  $d$  son números reales.

A menos que se especifique otra cosa, asumiremos que  $A$  es convexa, normal y acotado, (es decir  $-\infty < a, d < \infty$ ). El número difuso  $[a, b, c, d; 1]$  se representará por los cuatro números de la definición y por el uno que indica la propiedad de normalidad y  $[a, b, c, d; w]$  para los números difusos no normales. La imagen (el opuesto) de  $A = [a, b, c, d; w]$  puede definirse como  $-A = [-d, -c, -b, -a; w]$

**Definición II.9** El número difuso  $\tilde{A}$  será triangular si su función de pertenencia está dada por [182]:

$$f_A(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{x-c}{b-c}, & b \leq x \leq c \\ 0, & \text{de otro modo} \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

donde,  $a, b$ , y  $c$  son números reales.

En este caso el número difuso se expresa con  $[a, b, c; 1]$  y con el mismo significado que en el caso de números trapezoidales. El valor  $b$  se corresponde con la moda o el corazón del intervalo soporte  $[a, c]$ .

Donde

$$f_A^L : [a, b] \rightarrow [0, 1] \text{ y } f_A^R : [b, c] \rightarrow [0, 1]$$

Teniendo en cuenta la Definición II.8, es obvio que  $f_A^L(x)$  es la parte izquierda de la función de pertenencia del número difuso  $\tilde{A}$ , es continua y estrictamente creciente en  $[a, b]$  y  $f_A^R(x)$  es la parte derecha de la función de pertenencia del número difuso  $\tilde{A}$ , es continuo y estrictamente decreciente en  $[b, c]$ .

**Propiedades**

- Como  $f_A^L(x) : [a, b] \rightarrow [0, 1]$  es continua y estrictamente creciente la función inversa de  $f_A^L$  existe y está dada por  $g_A^L : [0, 1] \rightarrow [a, b]$  siendo también continua y estrictamente creciente en el intervalo cerrado  $[0, 1]$  entonces es integrable en  $[0, 1]$
- Puesto que  $f_A^R(x) : [b, c] \rightarrow [0, 1]$  es continua y estrictamente decreciente la función inversa de  $f_A^R$  existe y está dada por  $g_A^R : [0, 1] \rightarrow [b, c]$  siendo continua y estrictamente decreciente en el intervalo cerrado  $[0, 1]$ , siendo también integrable por la misma razón que  $g_A^L$ .
- Un punto interesante en los números difusos es aquel en el que  $f(x) = 1$  este valor se corresponde con la moda o corazón del número difuso.

$$Mod(f_A) = \{x \in \mathfrak{R} | f_A(x) = 1\}$$

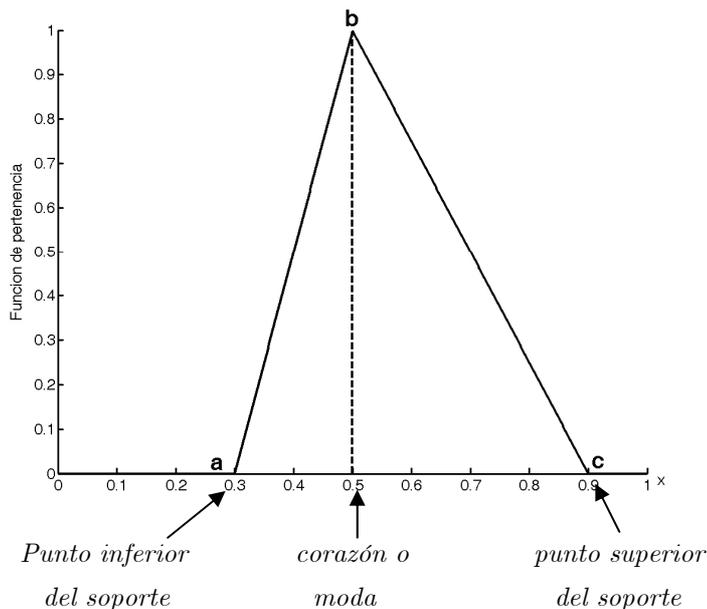


Figura II.5. Representación de un número difuso triangular con sus tres puntos fundamentales (a,b,c).

Un número difuso unimodal con moda  $b$  puede interpretarse como una representación de la propiedad aproximadamente igual a  $b$ .

Puesto que las funciones inversas de  $f_A^L$  y  $f_A^R$  existen y son integrables, estos valores integrales se utilizarán para ordenar números difusos.

**Definición II.10:** Dubois y Prade [109], Heilpern [148] y Bolaños [38] definieron el valor medio de un número difuso  $A$ , denotado por  $E[A]$  como la esperanza usual:

$$E[P] = \int_{-\infty}^{+\infty} x dF(x) \quad (\text{II.2})$$

Donde  $F$  es la función distribución de probabilidad asociada con la medida de probabilidad. Si consideramos las medidas superiores/inferiores de probabilidad es posible obtener:

$$E_*[P] = \int_{-\infty}^{+\infty} x dF^*(x) \quad (\text{II.3})$$

$$E^*[P] = \int_{-\infty}^{+\infty} x dF_*(x) \quad (\text{II.4})$$

Las operaciones para los números difusos positivos son como siguen García-Cascales y Lamata [133] Sean  $\tilde{A}$  y  $\tilde{B}$  dos números triangulares difusos parametrizados por las tripletas  $(a_1, b_1, c_1)$  y  $(a_2, b_2, c_2)$  respectivamente, entonces:

- Suma de números difusos:

$$\tilde{A} \oplus \tilde{B} = [a_1 + a_2, b_1 + b_2, c_1 + c_2] \quad (\text{II.5})$$

- Sustracción de números difusos:

$\tilde{A} \ominus \tilde{B} = A + (-B)$  donde el opuesto  $-B = (-c_2, b_2, a_2)$  entonces:

$$\tilde{A} \ominus \tilde{B} = [a_1 - c_2, b_1 - b_2, c_1 - a_2] \quad (\text{II.6})$$

- Multiplicación de números difusos:

$$\tilde{A} \otimes \tilde{B} = [a_1 \times a_2, b_1 \times b_2, c_1 \times c_2] \quad (\text{II.7})$$

- División de números difusos:

$$\tilde{A} \oslash \tilde{B} = \left[ [a_1, b_1, c_1] \cdot \left[ 1/c_2, 1/b_2, 1/a_2 \right] \right], \quad 0 \neq [a_2, b_2, c_2] \quad (\text{II.8})$$

- Multiplicación por un escalar:

$$k \circ \tilde{A} = (k \circ a_1, k \circ b_1, k \circ c_1) \quad (\text{II.9})$$

- Máximo y mínimo:

$$\begin{aligned} \text{Max}(\tilde{A}, \tilde{B}) &= [\text{Max}(a_1, a_2), \text{Max}(b_1, b_2), \text{Max}(c_1, c_2)] \\ \text{Min}(\tilde{A}, \tilde{B}) &= [\text{Min}(a_1, a_2), \text{Min}(b_1, b_2), \text{Min}(c_1, c_2)] \end{aligned} \quad (\text{II.10})$$

### II.1.3. ORDENACIÓN DE NÚMEROS DIFUSOS

Cuando los datos difusos se incorporan dentro de un modelo de de decisión multicriterio (MCDM), la evaluación final no son valores crisp, sino que son valores difusos. Desde que un valor difuso representa muchos posibles valores reales que tiene diferentes valores de pertenencia, no se fácil comparar la evaluación final para determinar cual de las alternativas es la preferida. En otras palabras, los números difusos no siempre proporcionan un conjunto completamente ordenado como lo hacen los números reales. En aplicaciones MCDM, cuando la evaluación final es difusa, es muy difícil distinguir el posible mejor curso de la acción del mediocre o incluso del peor.

El estudio de la ordenación difusa comenzó en los inicios de los años 70 y a continuación hacemos un repaso del estado del arte.

#### II.1.3.1. REVISIÓN DE LA LITERATURA

Para resolver el problema de la comparación de números difusos, muchos autores han propuesto métodos de ordenación de números difusos. Bortolan y Degani [44] proporcionaron no solo una revisión sistemática de las investigaciones en la ordenación de números difusos sino que dio resultados de la comparación entre ellos.

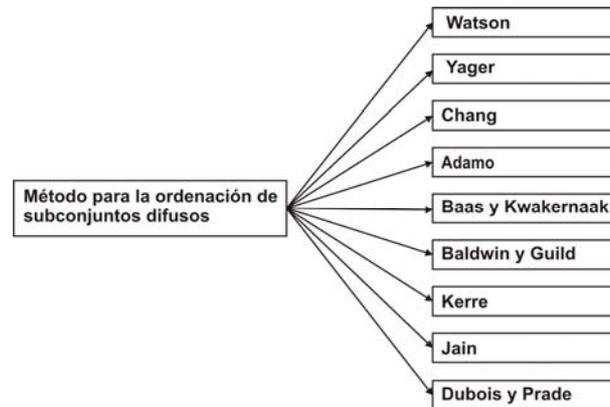


Figura II.6. Clasificación de la métodos de ordenación de números difusos según Bortolan y Degani [44]

Chen y Hwang [83] fueron los primeros que presentaron una veintena de métodos de ordenación de números difusos clasificados dentro de cuatro clases principales de acuerdo con el método que cada uno utiliza. Hay métodos de relación de preferencia, métodos de medida difusa y extensión, métodos de puntuación difusa y métodos de expresiones lingüísticas.

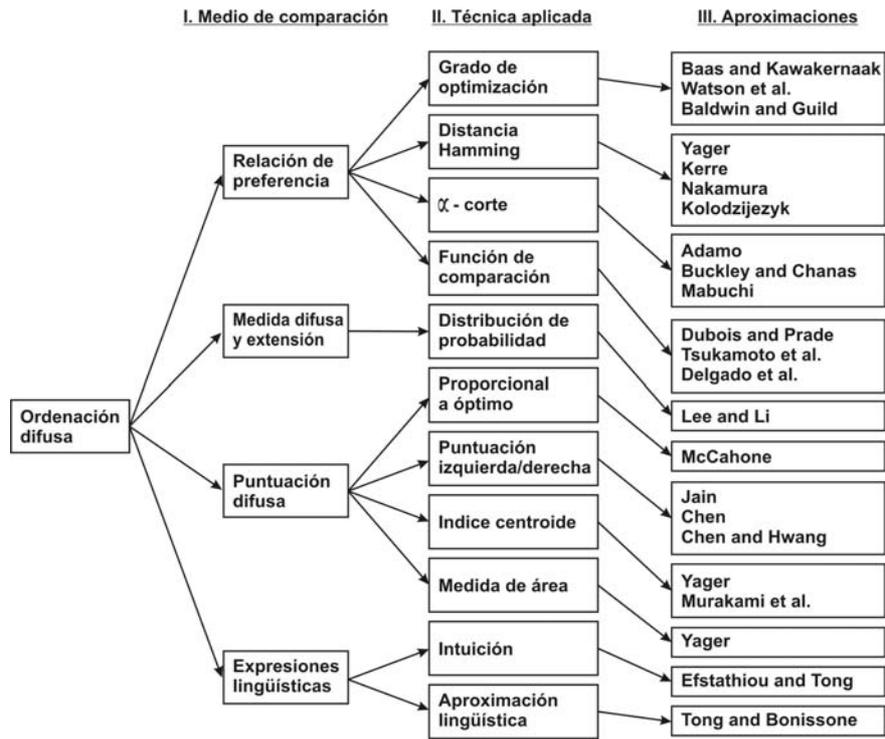


Figura II.7: Clasificación de los métodos de ordenación de números difusos según Chen y Hwang [83]

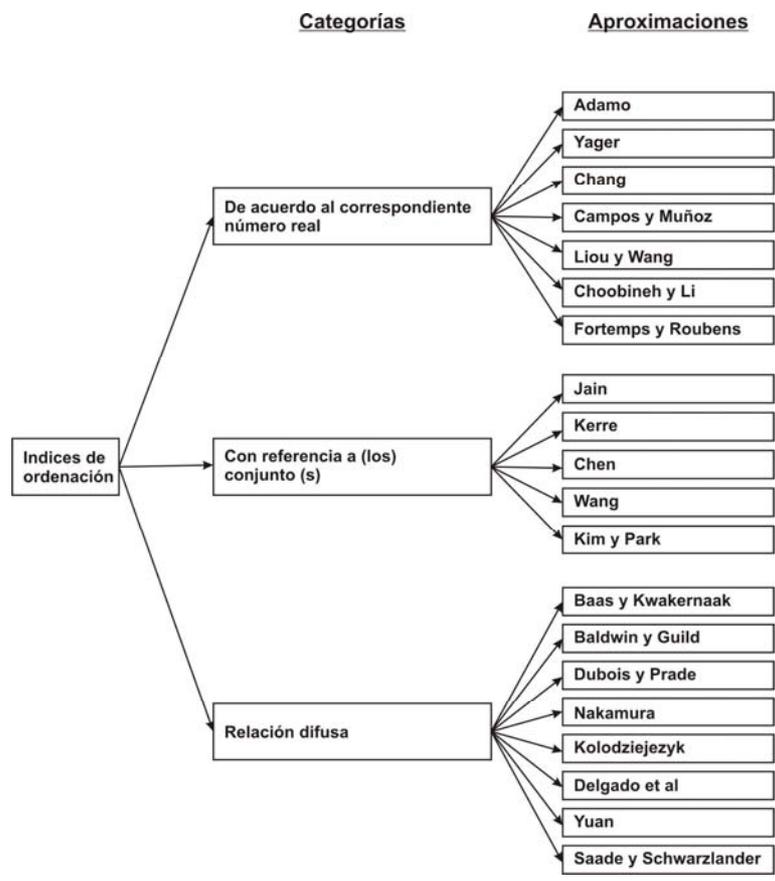


Figura II.8: Clasificación de los métodos de ordenación de números difusos según Wang y Kerre [324;325]

Y finalmente y más recientemente también Wang y Kerre [324;325], para organizar más de treinta índices de ordenación los clasificaron en tres categorías, de acuerdo al correspondiente número real, con referencia a los conjuntos y en función de las relaciones difusas.

### II.1.3.2. MÉTODOS DE ORDENACIÓN SEGÚN BORTOLAN Y DEGANI

De entre los métodos estudiados por Bortolan y Degani cabe destacar, los índices propuestos por Yager [341-343], la aproximación de Adamo [4], la aproximación de Baas y Kwakernaak [24], los métodos propuestos por Kerre [174], el índice de Jain [159;160], así como los grados de dominación propuestos por Dubois y Prade [108;109].

#### Aproximaciones de Yager

Yager [341-343] propuso cuatro índices los cuales podrían emplearse con el propósito de ordenar cantidades difusas en  $[0,1]$ .

$$Y_1(A_i) = \frac{\int_0^1 g(x) A_i(x) dx}{\int_0^1 A_i(x) dx} \quad (\text{II.11})$$

Donde  $g(x)$  mide la importancia del valor  $x$

$$Y_2(A_i) = \int_0^{hgt(A_i)} M(A_{i\alpha}) d\alpha \quad (\text{II.12})$$

Donde  $M(A_{i\alpha})$  es el valor medio de los elementos de  $A_{i\alpha}$

$$Y_3(A_i) = \int_0^1 |x - A_i(x)| dx \quad (\text{II.13})$$

$$Y_4(A_i) = \sup_{x \in [0,1]} \min(x, A_i(x)) \quad (\text{II.14})$$

#### Aproximación de Chang

El índice de Chang [78] está simplemente definido mediante la integral

$$CM(A_i) = \int_{x \in \text{supp} A_i} x A_i(x) dx \quad (\text{II.15})$$

#### Aproximación de Adamo

Adamo [4] utilizo el concepto de  $\alpha$ -corte para obtener un índice de  $\alpha$ -preferencia para un conjunto difuso  $M$  como:

$$F_\alpha(M) = \max \{x \in U \mid \mu_M(x) \geq \alpha\}, \quad \alpha \in [0,1] \quad (\text{II.16})$$

### Aproximación de Baas y Kwakernaak's

Baas y Kwakernaak [24] propusieron un método de ordenación que primero identifica un conjunto de conjuntos difusos preferidos. Se deriva una puntuación preferida,  $P$  para cada conjunto difuso preferido. La puntuación preferida denota cuanto mejor es un determinado conjunto difuso en relación a todos los conjuntos difusos. Un conjunto difuso con un mayor puntuación preferida es considera mejor que uno con menor puntuación.

Introdujeron el siguiente conjunto difuso condicional  $\widetilde{O/R}$

$$\widetilde{O/R}(i|x_1, x_2, \dots, x_n) = \begin{cases} 1 & \text{si } x_i \geq x_j (\forall j \neq i) \\ 0 & \text{de otro modo} \end{cases}$$

Entonces el índice de ordenación está definido por

$$\begin{aligned} BK(A_i) &= \sup_{x_1, \dots, x_n} \min(\widetilde{O/R}(i|x_1, \dots, x_n), \min(A_1(x), \dots, A_n(x))) \\ &= \sup_{\substack{x_1, x_2, \dots, x_n \\ x_1 \geq \max(x_2, \dots, x_n)}} \min(A_1(x_1), A_2(x_2), \dots, A_n(x_n)) \\ &= \min_{j \neq i} \sup_{x_i \geq x_j} \min(A_i(x_i), A_j(x_j)) \end{aligned}$$

Sea  $P_{BK}(A_i, A_j) = hgt(A_i) \geq P_{BK}(A_i, A_j) (\forall A_j \in A)$ , podríamos escribir:

$$BK(A_i) = \min_j P_{BK}(A_i, A_j) \quad (\text{II.17})$$

### Aproximación de Baldwin y Guild

Similar al conjunto difuso condicional de Baas y Kwakernaak, Baldwin y Guild [27] definieron una relación binaria difusa  $R_{ij}$  en  $\mathfrak{R}$  con el valor  $R_{i,j}(x_i, x_j)$  indicando cuanto mayor es  $x_i$  y  $x_j$ . El índice de ordenación está consecuentemente modificado como:

$$BG(A_i) = \min_{j \neq i} \sup_{x_i, x_j} \min(A_i(x_i), A_j(x_j), R_{ij}(x_i, x_j)) \quad (\text{II.18})$$

La determinación de  $R_{ij}$  depende de la aptitud frente al riesgo del decisor:

$$R_{ij}(x_i, x_j) = x_i - x_j \quad \text{para un decisor neutral}$$

$$R_{ij}(x_i, x_j) = x_i^2 - x_j^2 \quad \text{para un decisor arriesgado}$$

$$R_{ij}(x_i, x_j) = \sqrt{x_i} - \sqrt{x_j} \quad \text{para un decisor conservador (no arriesgado)}$$

Sea  $P_{BG}(A_i) = \sup_{x_i, x_j} \min(A_i(x_i), A_j(x_j), R_{ij}(x_i, x_j))$  entonces:

$$BG(A_i) = \min_{j \neq i} P_{BG}(A_i, A_j) \quad (\text{II.19})$$

### Aproximación de Kerre

Kerre [174] propuso un método de ordenación mediante el cálculo de la distancia Hamming entre  $A_i$  y  $\text{mãx}(A_1, \dots, A_n)$

$$K(A_i) = \int_S |A_i - \text{mãx}(A_1, \dots, A_n)(x)| dx \quad (\text{II.20})$$

donde  $S = \bigcup_{i=1}^n \text{supp } A_i$ . Donde  $\text{supp } A$  es el soporte del conjunto difuso  $A$

### Aproximación de Jain

El método de Jain [159;160] está basado en el siguiente conjunto difuso maximizado para todo  $x \in \mathfrak{R}$ :

$$A_{\text{max}}(x) = \left( \frac{x}{x_{\text{max}}} \right)^k$$

donde  $k > 0$  es un número real. La cantidad difusa se evalúa con el índice

$$J^k(A_i) = \sup_{x \in \mathfrak{R}} \min(A_{\text{max}}(x), A_i(x)) \quad (\text{II.21})$$

Cuanto mayor es  $J^k(A_i)$  implica un mayor ranking para  $A_i$

### Aproximaciones de Dubois y Prade

Basados en las medidas de posibilidad y necesidad, Dubois y Prade [108;109] propusieron cuatro relaciones difusas para comparar las cantidades difusas convexas normales  $A_i$  y  $A_j$

$$PD(A_i, A_j) = \sup_{\substack{x_i, x_j \\ x_i \geq x_j}} \min(A_i(x_i), A_j(x_j)) \quad (\text{II.22})$$

$$PSD(A_i, A_j) = \sup_{\substack{x_i, x_j \\ x_i \geq x_j}} \inf \min(A_i(x_i), 1 - A_j(x_j)) \quad (\text{II.23})$$

$$ND(A_i, A_j) = \inf_{\substack{x_i, x_j \\ x_i \geq x_j}} \sup \min(1 - A_i(x_i), A_j(x_j)) \quad (\text{II.24})$$

$$NSD(A_i, A_j) = 1 - \sup_{\substack{x_i, x_j \\ x_i \geq x_j}} \min(A_i(x_i), A_j(x_j)) \quad (\text{II.25})$$

### Aproximación de Watson et al

$NSD$  es idéntico a la relación difusa sugerida por Watson et al [329] para la comparación de de cantidades difusas.

### II.1.3.3. MÉTODOS DE ORDENACIÓN SEGÚN CHEN Y HWANG

En la clasificación presentada por Chen y Hwang [83] además de entre los que ya apuntaban Bortolan y Degani caben destacar las aproximaciones de Buckley y Chanas [56], Mabuchi [224], Lee y Li [209], etc.

#### Aproximación de Nakamura

Asumimos que  $A_1, A_2, \dots, A_n$  son números difusos. Nakamura [241] utilizó la distancia de Hamming  $d_H$  para comparar  $\underline{A}_i$  con  $\widetilde{\min}(\underline{A}_i, \underline{A}_j)$  y  $\bar{A}_i$  con  $\widetilde{\min}(\bar{A}_i, \bar{A}_j)$  respectivamente. Se introduce un parámetro  $\lambda$  ( $\lambda \in [0, 1]$ ) para describir la actitud del decisor. Así su relación difusa es:

$$P_{N^\lambda}(A_i, A_j) = \frac{\lambda d_H(\underline{A}_i, \min(\underline{A}_i, \underline{A}_j)) + (1 - \lambda) d_H(\bar{A}_i, \widetilde{\min}(\bar{A}_i, \bar{A}_j))}{\lambda d_H(\underline{A}_i, \underline{A}_j) + (1 - \lambda) d_H(\bar{A}_i, \bar{A}_j)} \quad (\text{II.26})$$

En el caso de  $\lambda d_H(\underline{A}_i, \underline{A}_j) + (1 - \lambda) d_H(\bar{A}_i, \bar{A}_j) = 0$ , se asume que  $P_{N^\lambda}(A_i, A_j) = \frac{1}{2}$ .

#### Aproximación de Kolodziejczyk

Utilizando el máximo difuso y la distancia Hamming, Kolodziejczyk [185] construyó las siguientes relaciones difusas:

$$P_{K1}(A_i, A_j) = \frac{d_H(\underline{A}_i, \widetilde{\max}(\underline{A}_i, \underline{A}_j)) + d_H(\bar{A}_i, \widetilde{\max}(\bar{A}_i, \bar{A}_j))}{d_H(\underline{A}_i, \underline{A}_j) + d_H(\bar{A}_i, \bar{A}_j)} \quad (\text{II.27})$$

$$P_{K2}(A_i, A_j) = \frac{d_H(\underline{A}_i, \widetilde{\max}(\underline{A}_i, \underline{A}_j)) + d_H(\bar{A}_i, \widetilde{\max}(\bar{A}_i, \bar{A}_j)) + d_H(A_i \cap A_j, \emptyset)}{d_H(\underline{A}_i, \underline{A}_j) + d_H(\bar{A}_i, \bar{A}_j) + 2d_H(A_i \cap A_j, \emptyset)} \quad (\text{II.28})$$

#### Aproximación de Buckley y Chanas

Buckley y Chanas [56] incluyeron una condición más restrictiva para la proposición  $M_{1_\alpha} > M_{2_\alpha}$ . Dados dos números difusos  $M_1$  y  $M_2$  y sus correspondientes  $\alpha$ -cortes,  $M_{1_\alpha} = [a_1, b_1]$  y  $M_{2_\alpha} = [a_2, b_2]$ . La ordenación esta determinada por la función:

$$M_1 > M_2 \text{ si y solo si } a_1 > b_2 \quad \forall \alpha \quad (\text{II.29})$$

#### Aproximación de Mabuchi

Mabuchi [224] se dio cuenta que utilizando un único  $\alpha$ -corte da un resultado inconsistente. Por lo que propusieron un procedimiento de ordenación que compara los conjuntos difusos utilizando múltiples valores de  $\alpha$ -cortes.

Primero de todo, se debe transformar los conjuntos difusos comparados en índices de tipo funcional  $J_{ij}(\alpha)$  que caracterizan el grado de dominación del conjunto difuso  $M_i$  sobre  $M_j$ . El  $\alpha \in [0, 1]$  es la notación del  $\alpha$ -corte. Cada

función  $J_{ij}(\alpha)$  puede expresarse lingüísticamente mediante la asignación de sentencias lingüísticas a cada forma de curva de  $\alpha$  frente a  $J_{ij}$ .

Una aproximación del cálculo de  $J^\circ$  está definido como sigue: discretiza el intervalo  $[0, h(D)]$  de  $\alpha$  en  $K$  subintervalos como:

$$J^\circ = \frac{2}{K^2} \left[ \sum_{i=0}^K i * J \left( \frac{i * h}{K} \right) - \frac{K}{2} * J(h) \right] \quad (\text{II.30})$$

Donde  $h = h(D)$  y  $J^\circ \in [-1, 1]$ , donde  $h(D)$  es el límite superior de  $\mu_D(v)$ . Este índice es considerado el peso medio de dominación de  $M_i$  sobre  $M_j$ . Los pesos son los  $\alpha$  valores.

La selección del número para el subintervalo  $K$  es bastante arbitraria. Cuanto mayor es el valor de  $K$  se requiere mayor esfuerzo de cálculo, pero se logra una mayor proximidad a la realidad de  $J^\circ$ .

### Aproximación de Tsukamoto et al

Tsukamoto et al [309] propusieron tres índices de ordenación teniendo en cuenta la teoría de la posibilidad. Para un par de números difusos  $M$  y  $N$ , los tres índices son  $\Pi(N < M)$ ,  $\Pi(N = M)$  y  $\Pi(N > M)$ . Denotan las posibilidades de los tres sucesos  $N < M$ ,  $N = M$  y  $N > M$ , respectivamente siendo  $M$  el conjunto de referencia. La medida de posibilidad con el mayor valor determina la relación de  $M$  y  $N$ .

Los tres índices de ordenación se derivan de las dos funciones de comparación:

- a) El conjuntos de números que posiblemente sean  $\geq x$  (con  $x$  siendo restringido por  $M$ )  $\mu_{M_L}(u)$  y
- b) El conjunto de números que posiblemente sean  $\leq x$ ,  $\mu_{M_R}(u)$

Sus funciones de pertenencia son  $\mu_{M_L}(u) = \sup_{u \geq x} \mu_M(x)$  y  $\mu_{M_R}(u) = \sup_{u \leq x} \mu_M(x)$

Entonces los tres índices en  $N$  y  $M$  se definen:

$$\Pi(N < M) = \sup_u \min(1 - \mu_{M_L}(u), \mu_N(u)) \quad (\text{II.31})$$

$$\Pi(N = M) = \sup_u \min(\mu_M(u), \mu_N(u)) \quad (\text{II.32})$$

$$\Pi(N > M) = \sup_u \min(1 - \mu_{M_R}(u), \mu_N(u)) \quad (\text{II.33})$$

El valor del índice mayor determina la relación entre  $M$  y  $N$ .

### Aproximación de Delgado et al

Delgado et al [102] sugirieron dos relaciones difusas muy generales mediante la utilización de los conceptos “mayor que  $F(\geq F)$ ” y “menor que  $F(\leq F)$ ” para un numero difuso dado  $F$ .

Se asume que  $M$  y  $N$  son números difusos y  $T$  es una t-norma. Se definen dos relaciones difusas  $\alpha_T$  y  $\gamma_T$ :

$$\alpha_T(N, M) = \sup_{x \in \mathfrak{R}} T(\geq N(x), M(x)) \quad (\text{II.34})$$

$$\gamma_T(N, M) = \sup_{x \in \mathfrak{R}} T(\leq N(x), M(x)) \quad (\text{II.35})$$

### Aproximación de Lee y Li

Lee y Li [209] propusieron la utilización de la media y la desviación típica generalizada basado en la medida de probabilidad. Asumieron dos clases de distribución de probabilidad para los eventos difusos y derivaron los correspondientes índices:

1. *Distribución uniforme:*  $f(M) = 1/|M|$  y  $M \in U$

Dado un número difuso  $M$ , su valor medio generalizado se calcula como:

$$\bar{X}_u(M) = \frac{\int_{S(M)} x \mu_M(x) dx}{\int_{S(M)} \mu_M(x) dx} \quad (\text{II.36})$$

El denominador mide el área bajo el número difuso  $M$

La desviación estándar se define como:

$$\sigma_u(M) = \left[ \frac{\int_{S(M)} x^2 \mu_M(x) dx}{\int_{S(M)} \mu_M(x) dx} - [\bar{X}_u(M)]^2 \right]^{1/2} \quad (\text{II.37})$$

Donde  $S(M)$  es el soporte del número difuso  $M$

2. *Distribución proporcional:*  $f(M) = k \cdot \mu_M(x)$ ,  $M \in U$ , donde  $k$  es la constante proporcional. Tenemos:

$$\bar{X}_p(M) = \frac{\int_{S(M)} x^2 \mu_M(x) dx}{\int_{S(M)} [\mu_M(x)]^2 dx} \quad (\text{II.38})$$

$$\sigma_p(M) = \left[ \frac{\int_{S(M)} x^2 [\mu_M(x)]^2 dx}{\int_{S(M)} [\mu_M(x)]^2 dx} - [\bar{X}_p(M)]^2 \right]^{1/2} \quad (\text{II.39})$$

### Aproximación de McCahone

McCahone [228] desarrolló un método que comparan los números difusos a algunos difusos ideales específicos. Los difusos ideales en esta aproximación son el máximo difuso y el mínimo difuso. La ordenación está determinada mediante la medida de que proporción del área del número difuso contribuye al máximo

difuso y al mínimo difuso. Cuanto mayor porcentaje contribuye un número difuso al máximo difuso, mayor es su ordenación y cuanto mayor porcentaje contribuya al mínimo difuso, menos es su ordenación.

Dados dos números difusos  $M_i$  y  $M_j$ , la contribución del número difuso  $M_i$  al máximo difuso se determina por:

$$P(M_i) = \frac{\int_{S(M_i)} [\mu_{\max}(x) \wedge \mu_{M_i}(x)] dx}{\int_{S(M_i)} \mu_{M_i}(x) dx} \quad (\text{II.40})$$

Donde  $\mu_{\max}(x) = \sup_{x=x_i \vee x_j} [\mu_{M_i}(x_i) \wedge \mu_{M_j}(x_j)]$ ,  $\forall x, x_i, x_j \in U$

De manera similar, la proporción de número difuso  $M_i$  que contribuye al mínimo difuso esta definido mediante:

$$N(M_i) = \frac{\int_{S(M_i)} [\mu_{\min}(x) \wedge \mu_{M_i}(x)] dx}{\int_{S(M_i)} \mu_{M_i}(x) dx} \quad (\text{II.41})$$

Donde  $\mu_{\min}(x) = \sup_{x=x_i \wedge x_j} [\mu_{M_i}(x_i) \wedge \mu_{M_j}(x_j)]$ ,  $\forall x, x_i, x_j \in U$

Una vez calculados  $P(M_i)$  y  $N(M_i)$ ,  $\forall i$  los números difusos se ordenan según un conjunto de reglas.

### Aproximación de Chen

Chen [82] se dio cuenta que el método de Jain no era aplicable si  $\text{supp}A_i \cap ]-\infty, 0[ \neq \emptyset$  para algunos  $i (1 \leq i \leq n)$ . Por lo que redefinió el conjunto maximizado difuso  $A_{\max}$  para cada  $x \in \mathfrak{R}$  como:

$$A_{\max}(x) = \left( \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \right)^k$$

Donde  $x_{\max}$  y  $k$  son los mismos que en el índice de Jain i  $x_{\min} = \inf \bigcap_{i=1}^n \text{supp}A_i$ . Entretanto, se introduce el concepto de conjunto minimizado  $A_{\min}$  definido como:

$$A_{\min}(x) = \left( \frac{x_{\max} - x}{x_{\max} - x_{\min}} \right)^k$$

Entonces se definen la utilidad izquierda  $L(A_i)$  y la utilidad derecha  $R(A_i)$  de la cantidad difusa  $A_i$  como:

$$L(A_i) = \sup_{x \in \mathfrak{R}} \min(A_{\min}(x), A(x))$$

$$R(A_i) = \sup_{x \in \mathfrak{R}} \min(A_{\max}(x), A(x))$$

Finalmente, la utilidad total se calcula como:

$$CH^k(A_i) = \frac{1}{2}(R(A_i) + 1 - L(A_i)) \quad (\text{II.42})$$

### Aproximación de Chen y Hwang

Chen y Hwang [83] descubrieron que el método de Jain podía dar resultados anti-intuitivos mientras que el método de Chen ignora la localización absoluta del número difuso en cuestión.

Para eliminar estos problemas, redefinieron un máximo difuso y un mínimo difuso.

$$\mu_{\max}(x) = \begin{cases} x, & 0 \leq x \leq 1, \\ 0, & \text{de otro modo} \end{cases}$$

$$\mu_{\min}(x) = \begin{cases} 1 - x, & 0 \leq x \leq 1, \\ 0, & \text{de otro modo} \end{cases}$$

El máximo difuso de Chen y Hwang es el mismo que el máximo difuso definido por Yager.

El proceso computacional es el mismo que en el de la aproximación de Chen excepto que la definición de  $\mu_{\max}(x)$  y  $\mu_{\min}(x)$  es diferente. La utilidad izquierda  $\mu_L(i)$  y la utilidad derecha  $\mu_R(i)$  de la cantidad difusa  $M_i$  como:

$$\mu_L(i) = \sup_x \min[\mu_{\min}(x), \mu_{M_i}(x)]$$

$$\mu_R(i) = \sup_x \min[\mu_{\max}(x), \mu_{M_i}(x)]$$

Finalmente, la utilidad total se calcula como:

$$\mu_T(i) = \frac{1}{2}[\mu_R(i) + 1 - \mu_L(i)] \quad (\text{II.43})$$

### Aproximación de Murakami et al

Murakami et al [237] propuso dos métodos de ordenación. Uno es el método del  $\alpha$ -corte que es el mismo que el índice de Adamo. El segundo consiste en encontrar el centro geométrico  $(x_0, y_0)$  para cada número difuso. La ordenación de los números difusos se realiza utilizando los ambos valores. El punto centroide  $(x_0, y_0)$  para cada número difuso se define como:

$$x_0 = \frac{\int_0^1 x \mu_M(x) dx}{\int_0^1 \mu_M(x) dx} \quad (\text{II.44})$$

$$x_0 = \frac{\int_0^1 x \mu_M d\mu_M(x)}{\int_0^1 \mu_M(x) dx} \quad (\text{II.45})$$

De acuerdo con Murakami et al, la opción óptima es el número difuso que alcanza el valor máximo en ambos ejes.

### Aproximación de Efstathiou y Tong

Efstathiou y Tong [114] propusieron una aproximación lingüística para ordenar las valoraciones finales difusas de las alternativas. La idea de fondo de este método es que puesto que la actitud ante el riesgo del decisor, el decisor debe participar a través de un parámetro relacionado con esa actitud, en el proceso de ordenación. Esto se realiza a través de un proceso interactivo que sigue un formato de pregunta/respuesta. Al decisor se le pide que revele sus preferencias entre dos valoraciones finales difusas. La ayuda a la decisión interactiva se utiliza repetitivamente para cada par de alternativas. Eventualmente se construye una matriz de relación difusa. La relación difusa se chequea para ver si es una relación de preferencia difusa. Si lo es, se puede determinar un orden lineal entre las alternativas, de otro modo, la relación difusa debe reconstruirse si se desea un orden lineal.

#### *Algoritmo*

Dados los números  $M_1, \dots, M_m$  los pasos del algoritmo son:

1. Definir el conjunto de términos que contienen las variedades de preferencia que requiere el decisor, como (fuertemente, ligeramente, mucho, sin preferencia...)
2. Preguntar al decisor que exprese sus preferencias lingüísticamente, para cada par de números difusos. Dando como resultado una matriz de comparación por pares de preferencias,  $L$ , donde  $r_{ij}, \forall i, j$  son relaciones de preferencia lingüística,  $r_{ii} =$  "no preferencia"  $\forall i$ . Si  $r_{ij}$  es un término de preferencia "no diferencia" entonces  $r_{ji} =$  "no diferencia" .
3. Para tener un orden lineal entre  $M_i, \forall i$ , la matriz  $L$  debe ser: Antireflexiva, antisimétrica y transitiva.

Si  $L$  satisface los tres requerimientos, tendremos un orden lineal entre los números difusos,  $M_i, \forall i$ . Sólo podremos obtener un orden parcial cuando dos o más alternativas no puedan ordenarse linealmente. El decisor debería repetir el proceso de nuevo si se desea un orden lineal.

### Aproximación de Tong y Bonissone

Tong y Bonissone [304] asumieron que la evaluación final para  $m$  alternativas se obtienen en forma de números difusos conocidos  $U_i, i = 1, \dots, m$  .

La dificultad de la ordenación puede resolverse mediante la introducción del conjunto de preferencia  $Z$ . Para definir el conjunto de preferencia primero debe definirse un vector  $V$  como:

$$V(U_i) = \min_j (\mu_D(U_i, U_j))$$

Que indica el grado en que la alternativa  $U_i$  domina a las otras.

El conjunto de preferencia,  $Z_k$  se define como

$$Z_k = U_k - \frac{\sum_{i=1}^n V(U_i) U_i}{\sum_{i=1, i \neq k}^n V(U_i)} \quad (\text{II.46})$$

#### II.1.3.4. MÉTODOS DE ORDENACIÓN SEGÚN WANG Y KERRE

Wang y Kerre [324;325], para organizar más de treinta índices de ordenación los clasificaron en tres categorías.

En la primera clase, cada índice está asociado con una función  $F$  el conjunto de las cantidades difusas a la línea real  $\mathfrak{R}$  para transformar las cantidades difusas involucradas en números reales. Las cantidades difusas son comparadas de acuerdo con la ordenación del correspondiente número real. Dentro de esta clasificación es necesario distinguir la inclusión de Choobineh y Li [88], Fortemps y Roubens [128], Campos y Muñoz [64] y Liou y Wang [220].

En la segunda clase, se establecen unos conjuntos de referencia para todas las cantidades difusas para que la ordenación se realice comparando con respecto a los conjuntos de referencia.

En la última clase, se construye una relación difusa para hacer comparaciones binarias entre las cantidades difusas involucradas. Estas comparaciones binarias sirven como base para obtener la ordenación final.

Una vez clasificados los índices, propusieron algunos axiomas que sirven como propiedades razonables para establecer la racionalidad de un proceso de ordenación.

#### Aproximación de Campos y Muñoz

Campos y Muñoz [64] propusieron para la ordenación de números difusos, una familia de índices denominados índices promedio. De la forma:

$$CM(A_i) = \int_Y f_{A_i}(\alpha) dP(\alpha) \quad (\text{II.47})$$

Donde  $Y$  es un subconjunto de intervalo unidad,  $P$  una medida de probabilidad en  $Y$  y  $f_{A_i} : Y \rightarrow \mathfrak{R}$  representa la posición del  $\alpha$ -corte  $A_{i\alpha}$  para

cualquier  $\alpha \in Y$ . La expresión sugerida por Campos y Muñoz es  $f_{A_i}(\alpha) = \lambda a_{i\alpha}^+ + (1 - \lambda) a_{i\alpha}^-$  con  $\lambda \in [0, 1]$  un indicador del optimismo-pesimismo del decisor.

### Aproximación de Liou y Wang

Sea  $A_1, A_2, \dots, A_n$  números difusos continuos. Supongamos la margen izquierda  $l_i$  que de  $A_i$  es una función estrictamente creciente y la margen derecha  $r_i$  de  $A_i$  que es una función estrictamente decreciente. Las funciones inversas de  $l_i$  y  $r_i$  se denotan mediante  $l_i^{-1}$  y  $r_i^{-1}$ , respectivamente, siendo integrables. El índice de ordenación propuesto por Liou y Wang [220] está definido mediante:

$$LW^\lambda(A_i) = \lambda \int_0^1 r_i^{-1}(y) dy + (1 - \lambda) \int_0^1 l_i^{-1}(y) dy \quad (\text{II.47})$$

Donde  $\lambda \in [0, 1]$  refleja el grado de optimismo de un decisor. Cuanto mayor es  $\lambda$  más optimista es el decisor.

### Aproximación de Choobineh y Li

Sea  $a$  y  $d$  dos números que satisfacen  $a \leq \inf \{x \mid x \in \bigcup_{i=1}^n \text{supp} A_i\}$  y  $d \geq \sup \{x \mid x \in \bigcup_{i=1}^n \text{supp} A_i\}$ , donde  $\text{supp} A_i$  es el soporte del conjunto difuso  $A_i$ . Choobineh y Li [88] evaluaron  $A_i$  mediante:

$$CL(A_i) = \frac{1}{2} \left( \text{hgt}(A_i) - \frac{1}{d - a} \left( \int_0^{\text{hgt}(A_i)} (d - a_{i\alpha}^+) d\alpha - \int_0^{\text{hgt}(A_i)} (a_{i\alpha}^- - a) d\alpha \right) \right) \quad (\text{II.48})$$

### Aproximación de Fortemps y Roubens

Sean  $A_1, A_2, \dots, A_n$  cantidades difusas convexas. Fortemps y Roubens [128] sugirieron la siguiente evaluación de  $A_i$

$$FR(A_i) = \frac{1}{2\text{hgt}(A_i)} \int_0^{\text{hgt}(A_i)} (a_{i\alpha}^- + a_{i\alpha}^+) d\alpha \quad (\text{II.49})$$

### Aproximación de Wang

Sean  $A_1, A_2, \dots, A_n$  números difusos. Inspirado en el método de Kerre, Wang [318] utilizó la proximidad de  $A_i$  al  $\bar{\text{max}}(A_1, A_2, \dots, A_n)$  para evaluar  $A_i$ . El  $A_i$  más próximo a  $\bar{\text{max}}(A_1, A_2, \dots, A_n)$  es el mejor  $A_i$ . Además Wang consideró la distancia Hamming con tres medidas de proximidad:

$$W(A_i) = \frac{\int_{\mathfrak{R}} \min(A_i(x), \bar{\text{max}}(A_1, A_2, \dots, A_n)) dx}{\int_{\mathfrak{R}} \max(A_i(x), \bar{\text{max}}(A_1, A_2, \dots, A_n)) dx} \quad (\text{II.50})$$

### Aproximación de Kim y Park

Similar al método de Chen, Kim y Park [178] también introdujeron el conjunto maximizado difuso y el conjunto minimizado difuso como conjuntos de referencia. Estaban definidos respectivamente para cualquier  $x \in \mathfrak{R}$ , como:

$$A_{\max}(x) = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} ; A_{\min}(x) = \frac{x_{\max} - x}{x_{\max} - x_{\min}}$$

Con los parámetros  $k \in [0,1]$  reflejando la aptitud ante el riesgo del decisor. El índice de ordenación está definido mediante:

$$KP^k(A_i) = k \text{ hgt}(A_i \cap A_{\max}) + (1 - k)(1 - \text{hgt}(A_i \cap A_{\min})) \quad (\text{II.51})$$

Cuando  $k = 1/2$  es el decisor neutral. Cuando  $k > 1/2$  o  $k < 1/2$ , decisor tiende a ser arriesgado o conservador. Claramente  $KP^{1/2} = CH^1$ .

### Aproximación de Yuan

Yuan [350] propuso una relación difusa que compara la extensión derecha  $\Delta_{ij}$  de un número difuso con la extensión izquierda  $\Delta_{ji}$  de otro número difuso. Se define como:

$$P_Y(A_i, A_j) = \frac{\Delta_{ij}}{\Delta_{ij} + \Delta_{ji}} \quad (\text{II.52})$$

Donde:

$$\Delta_{ij} = \int_{a_{i\alpha}^+ > a_{j\alpha}^-} (a_{i\alpha}^+ - a_{j\alpha}^-) d\alpha + \int_{a_{i\alpha}^- > a_{j\alpha}^+} (a_{i\alpha}^- - a_{j\alpha}^+) d\alpha$$

### Aproximación de Saade y Schwarzlander

Sean  $A_1, A_2, \dots, A_n$  cantidades difusas normales y convexas. Saade y Schwarzlander[272] construyeron el siguiente índice para hacer la comparación entre  $A_i$  y  $A_j$ .

$$P_{SS}(A_i, A_j) = d_H(\underline{A}_i, \overline{\max}(\underline{A}_i, \underline{A}_j)) + d_H(\overline{A}_i, \overline{\max}(\overline{A}_i, \overline{A}_j)) \quad (\text{II.53})$$

#### II.1.3.5. PROCESO DE ORDENACIÓN DE LIOU Y WANG

Un método simple para la ordenación de números difusos consiste en la representación de cada conjunto difuso en la línea real, donde existe una ordenación natural. Esta es una aproximación que han utilizado diferentes autores en la literatura como ha podido comprobarse en el epígrafe anterior.

**Definición II.11:** Sea  $A$  un número difuso definido mediante  $f_A^L(x)$  y  $f_A^R(x)$  con las funciones inversas asociadas  $g_A^L(y)$  y  $g_A^R(y)$  respectivamente, entonces el área generada por  $f_A^L(x)$  en  $[-\infty, b]$  está definido mediante:

$$S_L(A_i) = b - \int_a^b f_A^L(x) dx = \int_0^1 g_A^L(y) dy \quad (\text{II.54})$$

Esta área está relacionada con el lado izquierdo del número difuso y (II.1). Y el área generada por  $f_A^R(x)$  en  $[-\infty, d]$ , está definido por:

$$S_R(A_i) = b + \int_a^b f_A^R(x) dx = \int_0^1 g_A^R(y) dy \quad (\text{II.55})$$

Esta área está relacionada con el lado derecho del número difuso y (I.1).

**Observación II.1:** Si consideramos un número difuso triangular como en (I.1), es obvio que  $f_A^L(x) = (x-a)/(b-a)$  y la función inversa de  $f_A^L(x)$  es  $g_A^L(y) = a + (b-a)y$ ,  $y \in [0,1]$ . Así

$$S_L(A_i) = \frac{a+b}{2} \quad (\text{II.56})$$

**Observación II.2:** Si consideramos un número difuso triangular como en (II.1), es obvio que  $f_A^R(x) = (x-c)/(b-c)$  y la función inversa de  $f_A^R(x)$  es  $g_A^R(y) = c + (b-c)y$ ,  $y \in [0,1]$ . Así

$$S_R(A_i) = \frac{b+c}{2} \quad (\text{II.57})$$

**Definición II.12:** Liou y Wang definieron el índice de ordenación [220] y de manera similar otros investigadores como Campos et al [64] introduciendo una clase de función de ordenación para números difusos de la siguiente manera:

$$LW_i^\lambda(A_i) = \lambda S_R(A_i) + (1-\lambda) S_L(A_i) \quad (\text{II.58})$$

Donde  $\lambda \in [0,1]$  es un índice que representa el grado de optimismo de un decisor. Cuanto mayor es  $\lambda$  indica un mayor grado de optimismo. Más específicamente, cuando  $\lambda = 0$  representa un punto de vista del decisor pesimista, si  $\lambda = 1$  representa un decisor optimista y si  $\lambda = 0.5$  representa un decisor moderado. Desde un punto de vista formal es fácil ver que para  $\lambda = 0.5$  se obtiene el índice de Yager [341-343].

Nótese que  $LW_i^\lambda(A_i)$  es una especie de “valor central” solo cuando  $\lambda = 0.5$  o esté próximo a  $\lambda = 0.5$ , obtenido a través de una combinación convexa de los límites de los  $\alpha$ -cortes.

Este índice tiene problemas para discriminar cuando hay compensación de áreas, no siendo suficiente el índice de optimismo como es posible ver en el siguiente ejemplo.

**Ejemplo II.1:** Consideramos dos números triangulares difusos  $A = (1, 4, 5)$  y  $B = (2, 3, 6)$  con su representación dada en la Figura II.9.

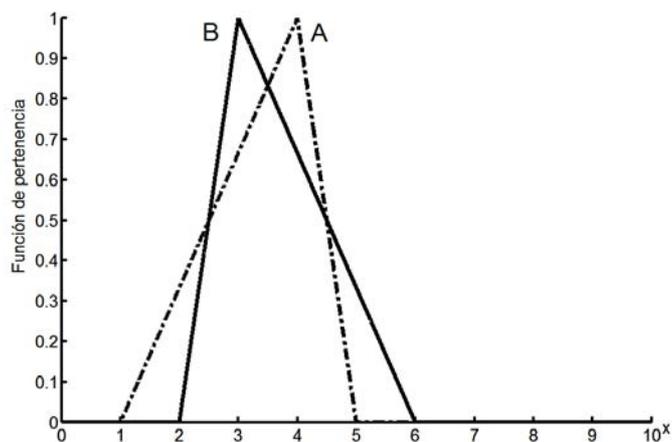


Figura II.9: Representación de los números difusos  $A$  y  $B$

Si tuviéramos que ordenar  $A$  y  $B$  una parte el  $Soporte(A) < Soporte(B)$  y por otra la  $Moda(A) > Moda(B)$ .

Si tenemos en cuenta las expresiones (II.56) y (II.57) obtenemos que:

$$S_L(A) = \frac{5}{2}, \quad S_R(A) = \frac{9}{2} \quad \text{y} \quad S_L(B) = \frac{5}{2}, \quad S_R(B) = \frac{9}{2}$$

Entonces, está claro que mediante el método de Liou y Wang, para un decisor neutral  $\lambda = 0.5$ , estos dos números difusos son iguales. Pero, para nuestra interpretación del número difuso  $B = (2, 3, 6)$ , podría ser la etiqueta lingüística “algo más que alrededor de 3” y la representación gráfica está dada en la Figura II.10.

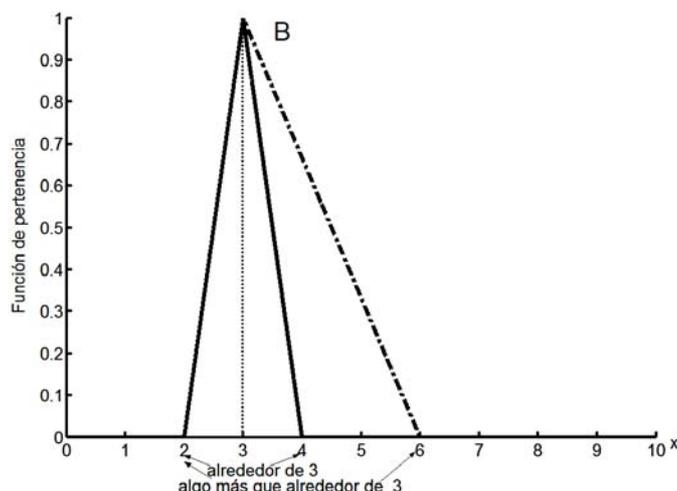


Figura II.10: Representación de la etiqueta “algo más que alrededor de 3”

Sería lógico pensar que la etiqueta “algo menos que alrededor de 4” (ver Figura II.11) es mejor que “algo más que alrededor de 3”, de manera que  $A = (1, 4, 5) > B = (2, 3, 6)$ .

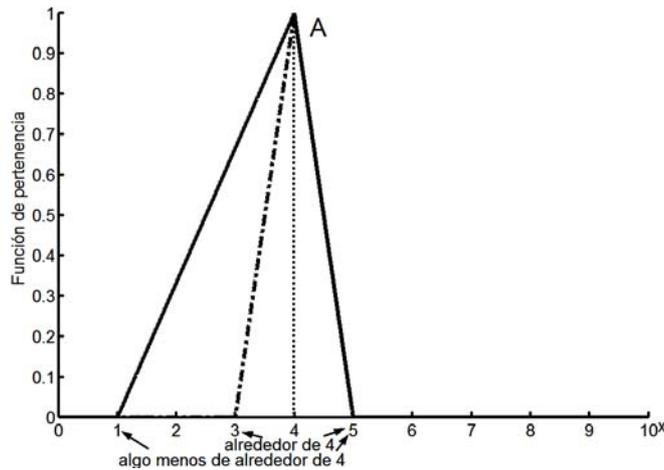


Figura II.11: Representación de la etiqueta “algo menos que alrededor de 4”

Sin embargo, si notamos que para valores de  $x$  con alto grado de pertenencia (y consecuentemente, valores en los que tenemos mayor grado de confianza o certidumbre),  $B$  debería ser considerada a la derecha de  $A$ . Ahora utilizaremos el valor de la moda, como parte del índice de ordenación.

### II.1.3.6. PROCESO DE ORDENACIÓN DE GARCIA-CASCALES Y LAMATA [133]

Debido a las limitaciones del índice de Liou y Wang presentamos un índice que mejora la discriminación que este hace, manteniendo el índice de optimismo e incluyendo un nuevo índice que denominaremos índice de modalidad  $\beta \in [0,1]$  y que representa cuanto de modal es el decisor. Esto es  $\beta$ , nos da el peso del valor central y  $(1 - \beta)$  el peso asociado a los extremos en la función convexa dada en (II.58).

Considerando y asumiendo que un decisor tiene tres diferentes puntos de vista (no solo dos) en el momento de tomar una decisión: optimista, pesimista y neutral; hemos pensado la posibilidad de introducir este último aspecto de la modalidad en la aproximación proporcionada por Liou y Wang.

En este caso, tenemos en cuenta los resultados e introducimos una nueva integral relacionada con el punto modal.

Un número difuso triangular (igual para cualquier otro tipo de números difusos) esta definido por tres puntos  $(a, b, c)$ , pero los métodos utilizados en la literatura solamente utilizan los extremos, el punto central es tenido en cuenta de manera indirecta, en las funciones  $f_A^L$  y  $f_A^R$ , así como en las respectivas  $g_A^L$  y  $g_A^R$ . En nuestro caso, queremos poner atención en este punto.

**Definición II.13:** Sea  $A = (a, b, c)$  un número difuso, definimos el área relacionada con la moda como

$$S_M(A_i) = b \tag{II.59}$$

El significado de  $S_L(A_i)$ ,  $S_M(A_i)$  y  $S_R(A_i)$  está expresado en la siguiente Figura II.12.

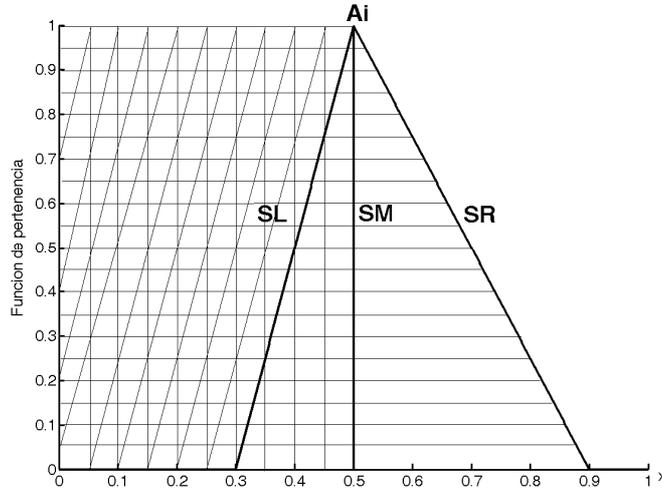


Figura II.12: Representación de  $S_L(A_i)$ ,  $S_M(A_i)$  y  $S_R(A_i)$

De este modo, definimos un índice que es una función de las tres integrales previamente definidas.

$$I(A_i) = f(S_L, S_R, S_M)$$

**Definición II.14: Las tres áreas como índice de medida (Índice de García-Cascales y Lamata):** Si  $A$  es un número difuso con función de pertenencia  $f_A$  como en (II.1), definimos el índice asociado con la ordenación como la combinación convexa [133]:

$$\begin{aligned} I_{\beta,\lambda} &= \beta S_M(A_i) + (1 - \beta) [LW_i^\lambda(A_i)] = \\ &= \beta S_M(A_i) + (1 - \beta) [\lambda S_R(A_i) + (1 - \lambda) S_L(A_i)] = \quad (II.60) \\ &= \beta S_M(A_i) + (1 - \beta) \lambda S_R(A_i) + (1 - \beta)(1 - \lambda) S_L(A_i) \end{aligned}$$

De este modo, hemos definido un número difuso como una función de tres integrales  $S_L(A_i)$ ,  $S_M(A_i)$  y  $S_R(A_i)$  donde  $S_R(A_i)$  representa la media superior asociada con la función de  $f_A^R(x)$ ,  $S_L(A_i)$  representa la media inferior de la función  $f_A^L(x)$  y  $S_M(A_i)$  es el área del corazón del número difuso,  $\beta \in [0,1]$  es el índice de modalidad que representa la importancia del valor central frente a los valores extremos y  $\lambda \in [0,1]$  es el grado de optimismo del decisor.

**Definición II.15** En general, dado un conjunto convexo de números difusos  $\underline{S} = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$  para su ordenación, es necesario obtener una aplicación del conjunto  $S$  en la recta real  $\mathfrak{R}$ .

$$I : \underline{S} \rightarrow \mathfrak{R}$$

$$A_i \rightarrow I_{\beta,\lambda}$$

Entonces, la ordenación está asociada con  $I_{\beta,\lambda}$  en  $\mathfrak{R}$ .

Por consiguiente, utilizaremos esta función (II.60) compuesto por las tres integrales como función de ordenación. Así, para dos números difusos  $A_i$  y  $A_j$ .

- Si  $I_{\beta,\lambda}(A_i) < I_{\beta,\lambda}(A_j)$ , entonces  $A_i < A_j$
- Si  $I_{\beta,\lambda}(A_i) = I_{\beta,\lambda}(A_j)$ , entonces  $A_i = A_j$
- Si  $I_{\beta,\lambda}(A_i) > I_{\beta,\lambda}(A_j)$ , entonces  $A_i > A_j$

Las siguientes propiedades se derivan de la definición.

1. Dados dos números difusos  $A_i$  y  $A_j$  se verifica que:

$$I_{\beta,\lambda}(A_i + A_j) = I_{\beta,\lambda}(A_i) + I_{\beta,\lambda}(A_j)$$

$$I_{\beta,\lambda}(\xi A_i) = \xi I_{\beta,\lambda}(A_i)$$

*Demostración:* Es directa teniendo en cuenta las propiedades de las funciones integrales

2. Dado un número difuso  $A_i = (a, b, d)$  y su opuesto  $-A_i = (-d, -b, -a)$  se verifican que:

$$I_{\beta,\lambda}(A_i + (-A_i)) = (1 - \beta)(2\lambda - 1)(S_R(A_i) - S_L(A_i))$$

*Demostración:* Teniendo en cuenta la última propiedad y que  $S_R(-A_i) = -S_L(A_i)$ ,  $S_L(-A_i) = -S_R(A_i)$  y  $S_M(-A_i) = -S_M(A_i)$ , entonces:

$$I_{\beta,\lambda}(A_i) = \beta S_M(A_i) + (1 - \beta)\lambda S_R(A_i) + (1 - \beta)(1 - \lambda)S_L(A_i) \text{ y}$$

$$I_{\beta,\lambda}(-A_i) = -\beta S_M(A_i) - (1 - \beta)\lambda S_R(A_i) - (1 - \beta)(1 - \lambda)S_L(A_i)$$

3. Si  $\beta = 1$  se verifica que  $I_{\beta,\lambda}(A_i) = -I_{\beta,\lambda}(-A_i) = 0$  y si  $\beta \neq 1$  pero  $\lambda = 1/2$  también  $I_{\beta,\lambda}(A_i) = -I_{\beta,\lambda}(-A_i) = 0$
4. Como hemos podido probar mediante la definición 4, el índice de Liou y Wang, es un caso particular del índice de ordenación presentado [133] cuando  $\beta = 0$ , obteniendo la solución “crisp” cuando  $\beta = 1$  y el índice de Yager se obtiene para  $\beta = 0$  y  $\lambda = 1/2$ .
5. Si  $\beta = 1/3$  y  $\lambda = 1/2$  obtenemos el índice

$$I_{1/3,1/2}(A_i) = \frac{1}{3}(S_L(A_i) + S_M(A_i) + S_R(A_i)) \quad (\text{II.61})$$

Sería el caso en el que las tres áreas tienen el mismo peso y se correspondería con el decisor neutral. Este es el bien conocido centro de gravedad.

**Observación II.3:** Si consideramos números difusos triangulares, y tenemos en cuenta (II.56), (II.57) y (II.59) obtenemos el valor  $I_{1/3,1/2}(A_i)$  para un decisor totalmente neutral como:

$$I_{\frac{1}{3}, \frac{1}{2}}(A_i) = \frac{1}{3} \left( \frac{a + 4b + d}{2} \right) \quad (\text{II.62})$$

Este valor particular coincide con el dado para el valor de la función en Delgado et al [104]. Sin embargo, es posible ver que nuestro índice y el índice de Delgado tienen diferente origen y aplicación. El valor de Delgado es una parte de la representación canónica de un número difuso. Mientras que nosotros formulamos un índice para la ordenación de números difusos en concordancia con la modalidad y optimismo de la aptitud del decisor.

### II.1.3.7. ESTUDIO COMPARATIVO

Consideremos cuatro números difusos:  $A_1=(0.1,0.2,0.3)$ ,  $A_2=(0.2,0.5,0.8)$ ,  $A_3=(0.3,0.4,0.9)$  y  $A_4=(0.6,0.7,0.8)$  cuya representación se da en la siguiente Figura II.13, la cual ha sido considerada por varios autores en la literatura.

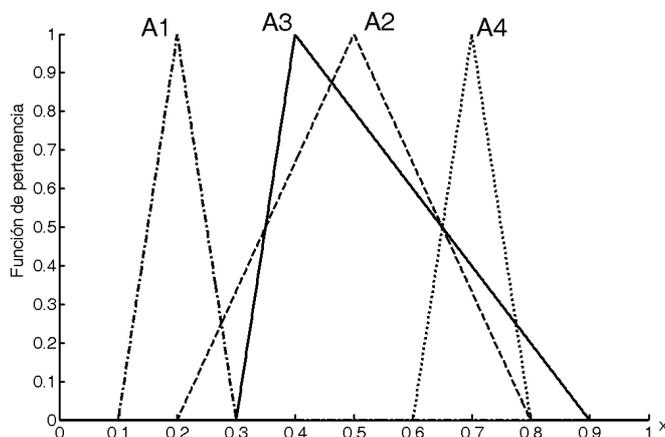


Figura II.13: Representación de cuatro números difusos

Si tenemos que ordenar  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  y  $A_4$  echando un vistazo a la forma de las funciones de pertenencia, podemos concluir a primera vista que la peor es  $A_1$  y que  $A_4$  es la mejor y que la relación entre  $A_2$  y  $A_3$  no está clara. Sin embargo, si nos fijamos en los valores de  $x$  con un alto grado de pertenencia (y en consecuencia, con valores con valores en los que tenemos un mayor grado de confianza o certeza),  $A_2$  podría considerarse a la derecha de  $A_3$ . Así, parece razonable que en una ordenación,  $A_2$  sea mejor que  $A_3$ . Entonces utilizamos el valor de la moda como parte del índice de ordenación.

Podemos probar que los métodos de Yager [341-343], Fortemps et al [128], Liou et al [220] y Chen [81] no discriminan entre los números difusos  $A_2$  y  $A_3$  para cualquier grado de optimismo, como se puede ver en la siguiente tabla II.1.

Table II.1: Comparativa entre métodos de ordenación

		$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$
<b>Yager</b>		0.20	<b>0.50</b>	<b>0.50</b>	0.70
<b>Fortemps</b>		0.20	<b>0.50</b>	<b>0.50</b>	0.70
<b>Liou</b>	$\lambda=1$	0.25	<b>0.65</b>	<b>0.65</b>	0.75
	$\lambda=0.5$	0.20	<b>0.50</b>	<b>0.50</b>	0.70
	$\lambda=0$	0.15	<b>0.35</b>	<b>0.35</b>	0.65
<b>Chen</b>	$\beta=1$	-0.20	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	-0.20
	$\beta=0.5$	-0.20	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	-0.20
	$\beta=0$	-0.20	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	-0.20

Con el método que se propone en la presente tesis doctoral,  $I_{\beta,\lambda}(A_i)$  es capaz de discriminar entre las alternativas  $A_2$  y  $A_3$  para cualquier  $\beta \neq 0$  como se muestra en la tabla II.2. En esta tabla cada casilla indica un par de valores  $(a,b)$  asociados con  $\beta$  y  $(1-\beta)$  respectivamente, con el objeto de calcular  $I_{\beta,\lambda}(A_i)$  y para los valores específicos de  $\lambda = 0, 0.5$  y  $1$ .

Tabla II.2: Pares de valores  $(a,b)$  asociados con  $\beta$  y  $(1-\beta)$  para calcular

$I_{\beta,\lambda}(A_i)$  para cualquier  $\beta \neq 0$ .

	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$
$\lambda=0$	(0.2, 0.15)	<b>(0.5, 0.35)</b>	<b>(0.4, 0.35)</b>	(0.65, 0.7)
$\lambda=0.5$	(0.2, 0.2)	<b>(0.5, 0.5)</b>	<b>(0.4, 0.5)</b>	(0.7, 0.7)
$\lambda=1$	(0.2, 0.25)	<b>(0.5, 0.65)</b>	<b>(0.4, 0.65)</b>	(0.7, 0.75)

$$\lambda = 1 \quad A_2 \rightarrow 0.5\beta + (1-\beta)0.65 = 0.65 - 0.15\beta$$

$$A_3 \rightarrow 0.4\beta + (1-\beta)0.65 = 0.65 - 0.25\beta$$

$$0.65 - 0.25\beta < 0.65 - 0.15\beta \Rightarrow A_3 < A_2$$

$$\lambda = 0.5 \quad A_2 \rightarrow 0.5\beta + (1-\beta)0.5 = 0.5$$

$$A_3 \rightarrow 0.4\beta + (1-\beta)0.5 = 0.5 - 0.1\beta$$

$$0.5 - 0.1\beta < 0.5 \Rightarrow A_3 < A_2$$

$$\lambda = 0 \quad A_2 \rightarrow 0.5\beta + (1-\beta)0.35 = 0.35 + 0.15\beta$$

$$A_3 \rightarrow 0.4\beta + (1-\beta)0.35 = 0.35 + 0.05\beta$$

$$0.35 + 0.05\beta < 0.35 + 0.15\beta \Rightarrow A_3 < A_2$$

Con esto obtenemos un intervalo para cada alternativa. Este intervalo representa El rango de posibles valores para  $I_{\beta,\lambda}(A_i)$ , como puede verse en la tabla II.3.

Tabla II.3: Rango de valores  $[a, b]$  asociados con  $\beta$  y  $\lambda$  para cada alternativa
$$I_{\beta, \lambda}(A_i)$$

	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$
$\lambda=0$	[0.15, 0.2]	[0.35, 0.5]	[0.35, 0.4]	[0.65, 0.7]
$\lambda=0.5$	0.2	0.5	[0.4, 0.5]	0.7
$\lambda=1$	[0.2, 0.25]	[0.5, 0.65]	[0.4, 0.65]	[0.7, 0.75]

Como caso particular podemos considerar los valores de  $\beta = 1/3$  y  $\lambda = 1/2$  que se correspondería con el decisor neutral y es el caso que vamos a considerar en nuestro ejemplo de aplicación.

$$I_{1/3, 1/2}(A_2) = 0.4 + \frac{1}{3} \left( \frac{0.9 + 0.9}{2} \right) = 0.5000$$

$$I_{1/3, 1/2}(A_3) = 0.5 + \frac{1}{3} \left( \frac{0.6 + 0.8}{2} \right) = 0.4666$$

Con el índice propuesto es posible establecer un orden:  $A_4 > A_2 > A_3 > A_1$  en cualquier situación excepto en casos donde  $\beta = 0$  que se correspondería con  $LW_i^\lambda(A_i)$  donde  $A_2 = A_3$ . Así el índice propuesto discrimina tan bien como el de Liou y Wang, Yager, Fortemps y Chen y mejora los casos en los que estos no pueden discriminar.

### II.1.3.8. CONCLUSIONES

Todos los métodos para la ordenación de números difusos tienen algún problema o desventaja como se ha discutido en el presente apartado, como dificultad de interpretación o inconsistencia con la intuición humana.

La aproximación perfilada en esta tesis doctoral, presenta todas las ventajas del método de Liou y Wang ya presentadas, mejorando el método en algunos casos donde el índice de Liou y Wang no es suficientemente discriminatorio.

El procedimiento propuesto produce resultados satisfactorios no solo en problemas bien definidos, sino también da soluciones a algunos casos donde este método podría no discriminar. Además los índices de Delgado et al, Campos et al Yager así como la solución crisp son casos particulares del método propuesto en este trabajo.

En  $I_{\beta, \lambda}(A_i)$ ,  $\beta$  significa el grado de importancia dado al valor modal con respecto a los extremos de los números difusos, mientras que  $\lambda$  indica el optimismo/pesimismo del decisor cuando se le da mayor o menor peso al área derecha/izquierda respectivamente.

Además, este método incluye la posibilidad de ordenar  $n$  números difusos al mismo tiempo, mientras que otros métodos de ordenación no tienen esta capacidad.

Finalmente, esta metodología no requiere un gran esfuerzo computacional para problemas a gran escala. También es muy simple y rápida de aplicar cuando se utilizan tanto números triangulares como trapezoidales.

#### II.1.4. EL MODELADO LINGÜÍSTICO DIFUSO

Los problemas presentes en el mundo real presentan aspectos que pueden ser de distinta naturaleza. Cuando dichos aspectos o fenómenos son de naturaleza cuantitativa, éstos se valoran fácilmente utilizando valores numéricos más o menos precisos. Sin embargo, cuando se trabaja con información vaga e imprecisa o cuando la naturaleza de tales aspectos no es cuantitativa como cualitativa, no es sencillo ni adecuado utilizar un modelado de preferencias numérico. En este caso, es más aconsejable utilizar otro tipo de modelado como, por ejemplo, el lingüístico.

Este tipo de aspectos suele aparecer frecuentemente en problemas en lo que se pretenden evaluar fenómenos relacionados con percepciones y relaciones de los seres humanos (diseño, gusto, diversión, etc.). En estos casos, se suelen utilizar palabras del lenguaje natural (bonito, feo, dulce, salado, simpático, mucha, poca, etc.) en lugar de valores numéricos para emitir tales valoraciones. Tal como se indica en [83;362], el uso de un modelado lingüístico de preferencias puede deberse a varias razones:

- La información disponible con la que trabajan los expertos es demasiado vaga o imprecisa para ser valorada utilizando valores numéricos precisos.
- Situaciones en las que la información no puede ser cuantificada debido a su naturaleza y sólo puede *medirse* utilizando términos lingüísticos. Por ejemplo, para evaluar el *confort* o el *diseño* de un coche [213], el uso de términos como *bueno medio* y *malo*, suele ser habitual.
- Información cuantitativa que no puede medirse porque no están disponibles los elementos necesarios para llevar a cabo una medición exacta o porque el coste de su medición es muy elevado. En este caso, el uso de un *valor aproximado* que permita reflejar los distintos valores del problema puede ser adecuado. Por ejemplo, imaginemos una situación en la que se pretende evaluar la *velocidad* de un coche y no disponemos de cronómetro, sirviéndonos tan sólo de nuestras percepciones. Entonces, en lugar de valores numéricos, podemos utilizar términos lingüísticos como, por ejemplo, *rápido*, *muy rápido* y *lento*, para medir la *velocidad*.

El modelado lingüístico difuso, que tiene como base teórica la Teoría de Conjuntos difusos, se ha mostrado como una técnica eficaz para valorar aspectos de la naturaleza cualitativa [5;19;41;42;101;150;306;339;344]. Para representar los aspectos cualitativos como valores lingüísticos, utiliza *variables lingüísticas* cuyo dominio de expresión son conjuntos de palabras o términos lingüísticos [354-356].

Una *variable lingüística* Delgado et al [103;359;360], Zadeh y Kacprzyk [359;360] y Herrera y Herrera-Viedma [149], se caracteriza por un *valor sintáctico* o

*etiqueta* y por un valor *semántico* o *significado*. La etiqueta es una palabra o frase perteneciente a un conjunto de términos lingüísticos y el significado de dicha etiqueta viene dado por un subconjunto difuso en un universo de discurso. Al ser las palabras menos precisas que los números, el concepto de variable lingüística es una buena propuesta para caracterizar aquellos fenómenos que no son adecuados para poder ser evaluados mediante valores numéricos. Formalmente una variable lingüística se define como:

**Definición II.16:** Una variable lingüística se caracteriza por un quintuplo:

$$\{X; T(X); U; G; M\}$$

Donde:

- $X$  es el nombre de la variable
- $T(X)$  es el término conjunto de  $X$ , esto es, la colección de sus valores lingüísticos.
- $U$  es un universo de discusión de la variable.
- $G$  es la regla sintáctica para la generación de los elementos de  $T(X)$  y
- $M$  es la regla semántica que asocia a cada elemento de  $T(X)$  su significado. Para cada valor  $L \in T(X)$ ,  $M(L)$  será un subconjunto difuso de  $U$ .

**Ejemplo II.2:** Consideremos la variable lingüística  $X=velocidad$  y la variable base  $u \in U$ , con  $U=[0,125]$ . El conjunto de términos asociados con la velocidad podría ser  $T(X) = \{baja, media, alta\}$ , donde cada término en  $T(X)$  es el nombre de un valor lingüístico de velocidad. El significado  $M(L)$  de una etiqueta  $L \in T(X)$  se define como la restricción  $L(u)$  sobre la variable base  $u$ , impuesta según el nombre de  $L$ . Por lo tanto,  $M(L)$  es un conjunto difuso de  $U$  cuya función de pertenencia  $L(u)$  representa la semántica del nombre  $L$ . LA representación gráfica del ejemplo puede observarse en la Figura II.14.

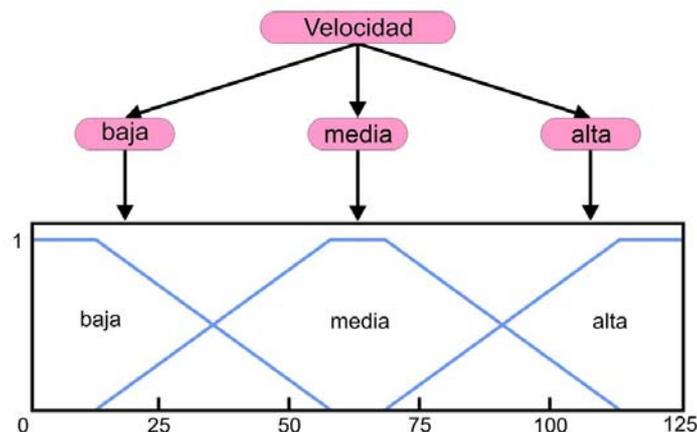


Figura II.14: Ejemplo de variable lingüística

En cualquier ámbito en el que deseemos aplicar un enfoque lingüístico difuso para la resolución de algún problema, debemos tomar dos decisiones:

- *Modelo de representación:* Elección del conjunto de términos lingüísticos junto con su semántica. De esta forma, se proporciona a una fuente de información (experto, juez, etc.) un número de términos con los que poder expresarla.
- *Modelo computacional:* Definir el modelo computacional seleccionando los correspondientes operadores de comparación y de agregación.

A continuación vamos a describir varios enfoques existentes tanto para generar el conjunto de términos lingüísticos como para definir la semántica que está asociada a los mismos.

#### II.1.4.1. ELECCIÓN DEL CONJUNTO DE TÉRMINOS LINGÜÍSTICOS

Para que una fuente de información pueda expresar con facilidad su información y conocimiento es necesario que disponga de un conjunto apropiado de descriptores lingüísticos. Un aspecto muy importante que es necesario analizar con el fin de establecer la descripción de una variable lingüística es la *granularidad de la incertidumbre* [40], es decir, la cardinalidad del conjunto de términos lingüísticos usado para expresar y representar la información.

Se dice que un conjunto de términos lingüísticos tiene:

- Una granularidad baja o un tamaño de grano grueso cuando la cardinalidad del conjunto de etiquetas lingüísticas es pequeña. Esto significa que el dominio está poco aprisionado y que existen pocos niveles de distinción de la incertidumbre, produciéndose una pérdida de expresividad.
- Una granularidad alta o un tamaño de grano fino cuando la cardinalidad del conjunto de etiquetas lingüísticas es alta. Esta situación puede provocar un aumento de la complejidad en la descripción del dominio.

La cardinalidad de un conjunto de términos lingüísticos no debe ser demasiado pequeña como para imponer una restricción de precisión a la información que quiere expresar cada fuente de información, y debe ser lo suficientemente grande como para permitir hacer una discriminación de las valoraciones en un número limitado de grados. Habitualmente, la cardinalidad usada en los modelos lingüísticos suele ser un valor impar como 5, 7 o 9, no superando las 11 o 13 etiquetas. El término medio representa una valoración de aproximadamente 0.5 y el resto de los términos se distribuyen alrededor de este [40]. Estos valores clásicos de cardinalidad parecen estar dentro de la línea de observación de Miller [230] sobre la capacidad humana, en la que se indica que se pueden manejar razonablemente y recordar alrededor de 7 o 9 términos diferentes.

Una vez establecida la cardinalidad, es necesario definir un mecanismo para generar los términos lingüísticos. Existen dos enfoques para esto, uno los define

a partir de una gramática libre de contexto y el otro mediante un orden total definido sobre el conjunto de términos lingüísticos.

#### II.1.4.2. SEMÁNTICA DEL CONJUNTO DE TÉRMINOS LINGÜÍSTICOS

Existen varios enfoques para definir la semántica del conjunto de etiquetas lingüísticas [42;305;340], siendo uno de los más utilizados el enfoque basado en funciones de pertenencia [40;43;103;142;303].

El enfoque basado en funciones de pertenencia define la semántica del conjunto de términos lingüísticos utilizando números difusos en el intervalo  $[0,1]$ , donde cada número difuso es descrito por una función de pertenencia [31;164;174]. Un método eficiente desde un punto de vista computacional para caracterizar un número difuso es usar una representación basada en parámetros de su función de pertenencia [41]. Debido a que las valoraciones lingüísticas dadas por las fuentes de información son aproximadas, algunos autores consideran que las funciones de pertenencia trapezoidales son lo suficientemente buenas como para representar la vaguedad de dichas valoraciones lingüísticas [40;41;103;303;304].

En la Figura II.15, se muestra la semántica de una variable lingüística que evalúa la altura de una persona utilizando números difusos definidos por funciones de pertenencia trapezoidales

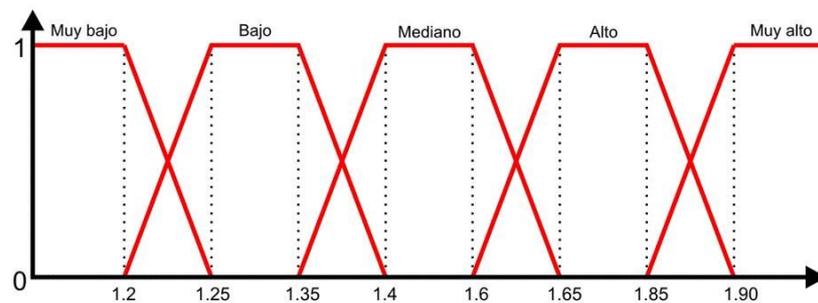


Figura II.15: Definición semántica de la variable lingüística *altura* usando funciones de pertenencia trapezoidales

$$T(\text{Altura}) = \{\text{Muy Bajo}, \text{Bajo}, \text{Mediano}, \text{Alto}, \text{Muy Alto}\}$$

$$\text{Muy Bajo} = (0, 0, 1.2, 1.25)$$

$$\text{Bajo} = (1.2, 1.25, 1.35, 1.4)$$

$$\text{Mediano} = (1.35, 1.4, 1.6, 1.65)$$

$$\text{Alto} = (1.6, 1.65, 1.85, 1.9)$$

$$\text{Muy Alto} = (1.85, 1.9, 2, 2)$$

Un caso particular de este tipo de representación son las funciones de pertenencia triangulares, en las que  $b = c$ . La Figura II.16 muestra el mismo conjunto visto anteriormente, pero representado ahora con funciones de pertenencia triangulares.

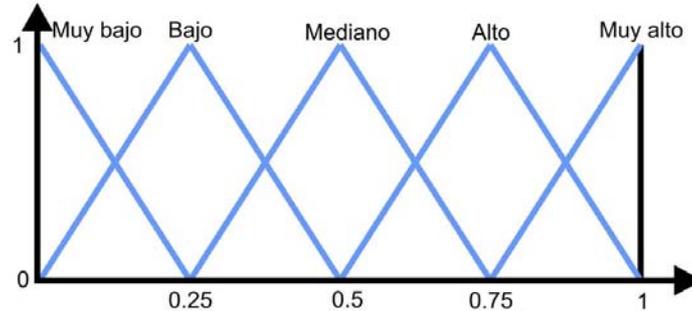


Figura II.16: Definición semántica de la variable lingüística *altura* usando funciones de pertenencia triangulares.

Este enfoque implica establecer las funciones de pertenencia asociadas a cada etiqueta. Esta tarea presenta el problema de determinar los parámetros según los puntos de vista de todas las fuentes de información. En la realidad, es difícil que todas las fuentes de información propongan exactamente las mismas funciones de pertenencia asociadas a los términos lingüísticos, debido a que cada una de ellas puede interpretar de forma parecida, pero a la vez diferente, el mismo concepto. Por ejemplo, dos percepciones muy cercanas pero diferentes de la evaluación del concepto *excelente* pueden verse en la Figura II.17.

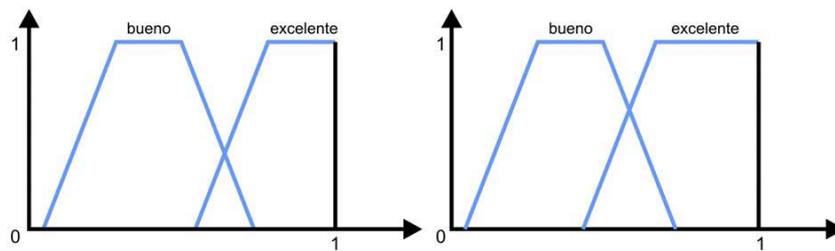


Figura II.17: Distribuciones diferentes del concepto *excelente*.

Por lo tanto, puede darse el caso de términos lingüísticos con una sintaxis similar pero con diferente semántica [150].

En nuestro caso trabajaremos con variables lingüísticas usando funciones de pertenencia triangular y donde utilizaremos la sintaxis que la ANECA ha definido para el Programa de Evaluación Institucional [16], como veremos en el bloque correspondiente al S.A.D.

#### **II.1.4. RESUMEN**

En este capítulo se ha presentado el área del Soft Computing, y en particular, entre todas las técnicas que se engloban en el área del Soft Computing, se hará un uso especialmente significativo de los conjuntos difusos, especialmente en el modelado lingüístico difuso que como veremos posteriormente utilizaremos para el modelado en el caso de los pesos de los criterios y en la evaluación de las alternativas.

## CAPÍTULO II.2

### Valoración de Alternativas

---

#### II.2.1.INTRODUCCIÓN

Como ya se ha comentado la fase de “*Análisis del Problema de Decisión*” (véase la Figura I.3 del bloque de introducción) tiene dos vertientes: una primera parte de “*Evaluación de Alternativas*” en la cual nos vamos a centrar en este capítulo y una segunda de “*Elección de una Opción*”.

Asimismo como también hemos comentado en el bloque anterior, los métodos clásicos resultan ineficientes para problemas de decisión complejos, sobre todo en aquellos casos en los que nos encontramos con criterios de los que solo disponemos de información cualitativa. Por ello resulta más interesante la utilización de métodos híbridos donde se combinen las ventajas que puedan aportar cada uno de dichos métodos.

De este modo planteamos un sistema híbrido de la siguiente manera, ver figura II.18. Utilizaremos la metodología del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para la obtención del peso de los criterios y el método TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) para la evaluación de las alternativas.

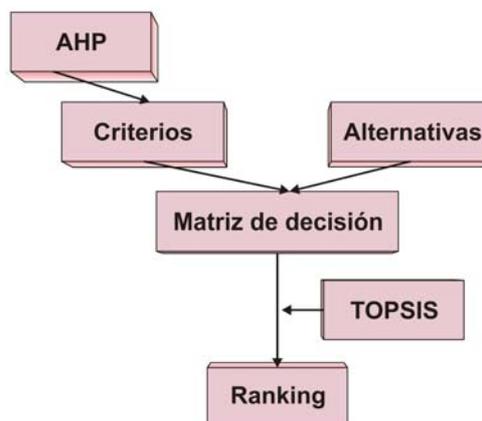


Figura II.18: Esquema de valoración de alternativas

De esta manera, el capítulo se estructura de la siguiente forma: la primera parte está dedicada al estudio del método AHP y la segunda parte en el que estudiaremos el método TOPSIS. En ambos casos, analizamos los pasos a seguir en el ámbito del modelado lingüístico difuso en el que trabajamos.

## II.2.2. EL PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (AHP)

### II.2.2.1. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

El Proceso Analítico Jerárquico (*Analytic Hierarchy Process, AHP*), propuesto por Saaty en 1980 [275], se basa en la idea de que la complejidad inherente a un problema de toma de decisión con criterios múltiples, se puede resolver mediante la jerarquización de los problemas planteados.

Este método puede considerarse, según la orientación dada al mismo, de muy diversas maneras. Su contribución es importante en niveles operativos, tácticos y estratégicos, sirviendo para mejorar el proceso de decisión debido a la gran información que aporta y a la mejora en el conocimiento del problema. Se puede entender como:

- Una técnica que permite la resolución de problemas multicriterio, multientorno y multiactores, incorporando en el modelo los aspectos tangibles e intangibles, así como el subjetivismo y la incertidumbre inherente en el proceso de toma de decisión.
- Una teoría matemática de la medida generalmente aplicada a la influencia entre alternativas respecto a un criterio o atributo.
- Una filosofía para abordar, en general la toma de decisión.

La principal característica del AHP es que el problema de decisión se modeliza mediante una jerarquía en cuyo vértice superior está el principal objetivo del problema, meta (goal) a alcanzar, y en la base se encuentran las posibles alternativas a evaluar. En los niveles intermedios se representan los criterios (los cuales a su vez se pueden estructurar también en jerarquías) en base a los cuales se toma la decisión. El diseño de las jerarquías requiere experiencia y conocimiento del problema que se plantea, para la cual es indispensable disponer de toda la información necesaria.

La segunda característica del método es que, en cada nivel de la jerarquía, se realizan comparaciones entre pares de elementos de ese nivel, en base a la importancia o contribución de cada uno de ellos al elemento de nivel superior al que están ligados. Este proceso de comparación conduce a una escala de medida relativa de prioridades o pesos de dichos elementos. Las comparaciones por pares se realizan por medio de ratios de preferencia (si se comparan alternativas) o ratios de importancia (si se comparan criterios), que se evalúan según una escala numérica propuesta por el método, que más adelante se presentará. Los pesos o prioridades relativas deben sumar la unidad.

La tercera característica del AHP es que la información obtenida es generalmente redundante y más o menos inconsistente. Las matrices de comparaciones por pares contienen juicios redundantes en el sentido de que en una matriz de tamaño  $n \times n$  se suelen emitir  $n \cdot (n - 1) / 2$  juicios (ya que conocido un término  $a_{ij}$  se obtiene fácilmente el término  $a_{ji}$  por la propiedad de reciprocidad), cuando de hecho solo se necesitaran  $n - 1$  juicios si se utilizase el álgebra (pues si se conoce el término  $a_{ij}$  y el término  $a_{jk}$  es posible conocer, mediante sencillos cálculos, el término  $a_{ik}$ ). Esta diferencia en el número de juicios supone tiempo invertido que se podría haber evitado y puede producir inconsistencias dentro de la matriz. Sin embargo, desde otro punto de vista, esta redundancia resulta útil para mejorar la exactitud de los juicios y se aprovecha para, mediante la técnica matemática, reducir los errores y mejorar la consistencia de la matriz.

Por último, una vez evaluada la contribución de cada elemento a los elementos del nivel de la jerarquía inmediatamente superior, se calcula la contribución global de cada alternativa al objetivo principal o meta mediante una agregación de tipo aditivo.

En resumen, según Saaty [278], el método AHP es un modelo de decisión que interpreta los datos y la información directamente mediante la realización de juicios y medidas en una escala de razón dentro de una estructura jerárquica establecida. Es un método de selección de alternativas (estrategias, inversiones, etc.) en función de una serie de criterios o variables, las cuales suelen estar en conflicto.

#### II.2.2.2. AXIOMAS BÁSICOS

Los axiomas básicos en los que se basa la teoría AHP son [314]:

- **Axioma de comparación recíproca:** El decisor debe ser capaz de realizar comparaciones y establecer la fuerza de sus preferencias. La intensidad de estas preferencias debe satisfacer la condición recíproca: “Si  $A$  es  $x$  veces preferido que  $B$ , entonces  $B$  es  $1/x$  veces preferido que  $A$ ”.
- **Axioma de homogeneidad:** “Las preferencias se representan por medio de una escala limitada”
- **Axioma de independencia:** “Cuando se expresan preferencias, se asume que los criterios son independientes de las propiedades de las alternativas”.
- **Axioma de las expectativas:** “Para el propósito de la toma de una decisión, se asume que la jerarquía es completa”.

#### II.2.2.3. METODOLOGÍA DEL PROCESO ANALÍTICO JERARQUICO

Las etapas generales de la metodología AHP propuestas por Saaty [278] en su formulación inicial son:

**1º etapa) Modelización:** En esta etapa se construye un método o estructura jerárquica en la que quedan representados todos los aspectos considerados relevantes en el proceso de resolución: actores, escenarios, factores, elementos e interdependencias. La jerarquía resultante debe ser completa, representativa, no redundante y minimalista. Su construcción es la parte más creativa del proceso de resolución, pudiendo aparecer posiciones enfrentadas entre los distintos participantes.

**2ª etapa) Valorización:** En la segunda etapa se incorporan las preferencias, gustos y deseos de los actores mediante los juicios incluidos en las denominadas matrices de comparación por pares. Estas matrices cuadradas reflejan la dominación relativa de un elemento frente a otro respecto a un atributo o propiedad común. El significado teórico es el siguiente, de los dos elementos comparados, se toma como referencia el que posee en menor medida o grado la característica en estudio y se da un valor numérico de las veces que “el mayor” incluye, recoge, domina o es más preferido que “el menor” respecto al atributo estudiado.

**3ª etapa) Priorización y síntesis:** Esta última etapa proporciona las diferentes prioridades consideradas en la resolución del problema. Se entiende por prioridad una unidad abstracta válida para cualquier escala en la que se integran las preferencias que el individuo tiene al comparar aspectos tangibles e intangibles. En el problema de decisión se consideran tres tipos de prioridades:

- **Las prioridades locales:** Que son las prioridades de los elementos que cuelgan de un nodo común.
- **Las prioridades globales:** Que son la importancia de esos elementos respecto a la meta global fijada para el problema. La forma de calcular las prioridades globales consiste en aplicar el principio de composición jerárquica: multiplicando los diferentes pesos que aparecen en el recorrido de la jerarquía desde el elemento inferior u hoja hasta la meta.
- **La prioridad final o total:** De una alternativa se obtiene agregando las prioridades globales obtenidas para esa alternativa en los diferentes caminos a que la unen con la meta. El método habitualmente empleado en AHP para la agregación es el equivalente a la suma ponderada.

**4ª etapa) Análisis de sensibilidad:** se suele hacer para examinar el grado de sensibilidad del resultado obtenido en una decisión al realizar cambios en las prioridades de los criterios principales de un problema. Lo que se lleva a cabo es un cambio en la prioridad de un determinado criterio manteniendo las proporciones de las prioridades de los otros criterios, de manera que todos ellos, incluido el criterio alterado, al modificarse sigan sumando la unidad.

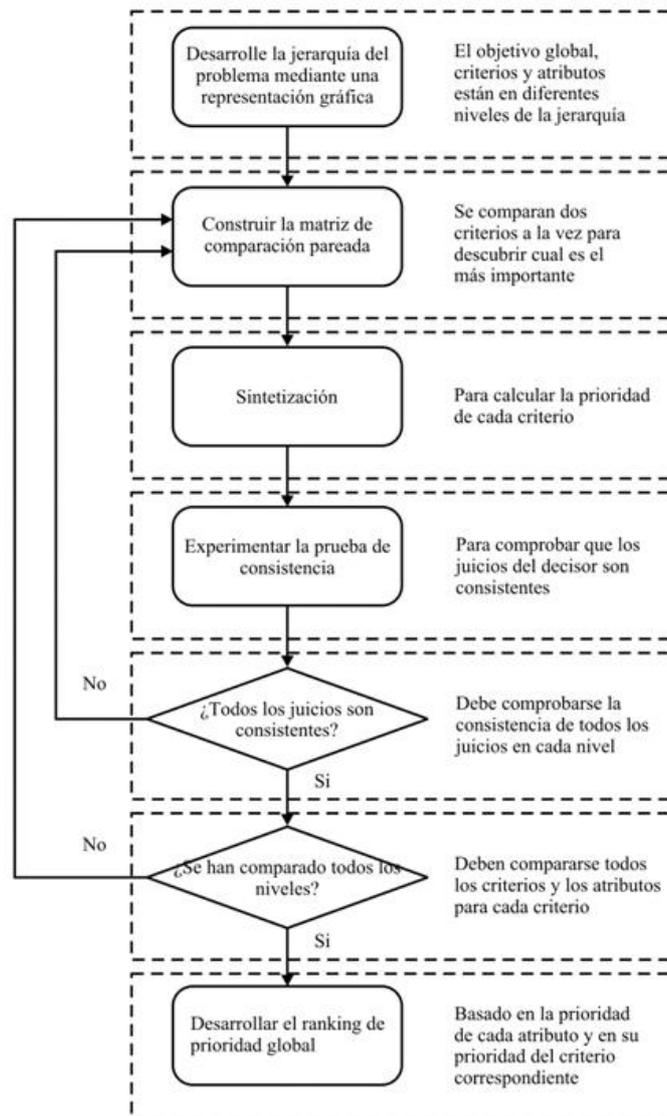


Figura II.19: Diagrama de flujo del proceso analítico jerárquico AHP [152]

Estas etapas generales se pueden concretar en una serie de pasos. Los pasos que hay que seguir en el método AHP son los siguientes [278]:

### **Paso 1: Estructurar el problema como una jerarquía**

El primer paso del método AHP consiste en modelar el problema de decisión que se pretende resolver como una jerarquía. Este hecho es una de las principales características del método, de ahí el término “jerárquico” aparece en su denominación.

La jerarquía adopta la siguiente forma:

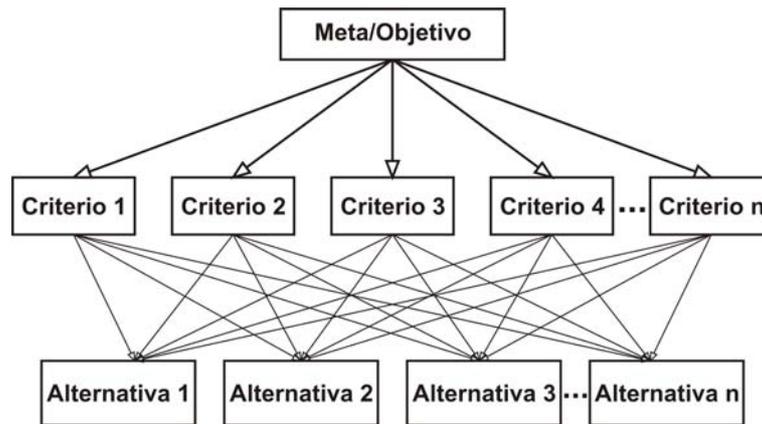


Figura II.20: Jerarquía en AHP

- En el vértice superior de la jerarquía se sitúa la *meta u objetivo* que se pretende alcanzar. El problema de decisión consiste en elegir la alternativa que mejor contribuye a la consecución de la meta del nivel superior de la jerarquía.
- En el siguiente nivel, en orden descendente desde la meta, se sitúan los criterios. Como ya se comentó, los criterios de decisión corresponden a aspectos tales como atributos, objetivos o parámetros que constituyen los ejes fundamentales a partir de los cuales el decisor justifica, transforma y argumenta sus preferencias. La selección adecuada de los criterios constituye una etapa fundamental en cualquier proceso de toma de decisión, ya que un planteamiento inadecuado de los mismos puede llevar a resultados poco satisfactorios o incluso a invalidar todo el proceso: se deben definir los criterios que son importantes en el problema.

El conjunto de criterios a considerar difiere según sea el agente decisor y el tipo de problema que se analice, por eso no se puede proponer un conjunto de criterios fijo que sirva para cualquier situación. No obstante, si se pueden sugerir algunas recomendaciones para la selección de los criterios.

En primer lugar los criterios deben ser comprensibles y medibles, es decir, el valor del atributo ha de ser el adecuado para expresar o medir el grado de cumplimiento del objetivo asociado y debe ser posible asociarle una escala conocida, bien mediante la obtención de una distribución de probabilidad sobre los distintos niveles del atributo para cada alternativa, o bien mediante la asignación de un orden a las preferencias del decisor para los diferentes niveles del atributo.

También es recomendable que el conjunto de atributos tenga las siguientes propiedades:

- *Compleitud:* Se considera completo cuando el conjunto de atributos es adecuado para indicar el grado de cumplimiento de todos los objetivos, condición que se satisface si todos los objetivos del nivel más bajo de la jerarquía incluyen a todas las áreas

implicadas en el problema y si los atributos asociados a estos objetivos satisfacen la propiedad de comprensibilidad.

- *Descomponibilidad*: Los atributos deben permitir la simplificación del proceso de evaluación mediante la descomposición en partes del problema.
- *No redundancia*: El conjunto de atributos debe evitar cuantificar dos veces las mismas consecuencias.
- *Minimalidad*: El conjunto de atributos debe ser lo más pequeño posible sin que se pierdan por ello aspectos importantes. Esta condición se formaliza diciendo que no debe existir otro conjunto completo de atributos que represente el mismo problema con un número menor de atributos.

Una vez definidos los criterios puede darse el caso e que éstos a su vez se puedan descomponer en otros subcriterios formando otra jerarquía descendente. Durante la construcción de esta jerarquía de criterios y subcriterios se debe analizar el problema en profundidad con el fin de representarlo de la forma más completa y global posible (aunque dejando abierta la posibilidad de algunos cambios en los elementos), considerar el entorno que rodea al problema, identificar los atributos que contribuyen a la solución y considerar a las personas interesadas en el problema.

- Finalmente, en el último nivel de la jerarquía se sitúan las *alternativas*, que son el conjunto de posibles opciones definidas sobre las que la unidad decisora realiza una decisión. El Proceso Analítico Jerárquico pretende ser una herramienta de ayuda al decisor en el proceso de elección de la alternativa que mejor contribuye a alcanzar la meta del problema planteado.

## **Paso 2: Establecimiento de las prioridades entre los criterios**

El objetivo de este paso es construir un vector de prioridades o pesos que evalúa la importancia relativa que la unidad decisora otorga a cada criterio.

El problema clave que se plantea en este punto es responder a cómo se puede asignar un valor numérico a cada criterio que represente, del modo más ajustado posible, la preferencia del decisor de un criterio frente a otro. Para ello existen dos estrategias: *asignación directa* (mediante una escala definida que correlaciona valores de grado con valores numéricos) o *asignación indirecta* (mediante técnicas de comparación entre criterios).

La *asignación directa* es sencilla, ya que el decisor sólo tiene que realizar una valoración sobre la importancia del criterio verbalizada en términos cualitativos y después acudir a una escala, que previamente ha sido establecida, para obtener los valores numéricos que se corresponden con su valoración. Por tanto, como paso previo a la resolución del problema de asignación de pesos, se debe definir la correspondencia entre la valoración cualitativa del decisor y la asignación numérica.

Utilizando una aplicación un tanto reduccionista, aunque sin pérdida de generalidad, podemos afirmar que esta correspondencia es lo que se conoce como la *función utilidad*, de Von Neumann [317]. Esta función debe ser definida por el decisor, aunque lo más habitual es el uso de correspondencias establecidas, dado que la construcción de una función de utilidad propia supone un coste de trabajo muy alto y podría resultar incluso ineficiente en determinadas decisiones. Algunas de las escalas de asignación directa más comunes en la bibliografía son las que se presentan en la Tabla II.4.

El otro método de asignación de pesos es la asignación indirecta, que implica un análisis más exhaustivo. Esta técnica constituye la segunda de las características del método AHP, para establecer las prioridades de los criterios, éste método emplea los conceptos matemáticos de autovalor/vector y autovalor/vector propio y realiza comparaciones entre pares de criterios.

Tabla II.4: Propuestas de escalas de asignación directa

Valoración cualitativa	Valoración cuantitativa	
	Escala simple	Escala de Saaty
Muy débil	1	1
Débil	2	3
Moderada	3	5
Fuerte	4	7
Muy fuerte	5	9

Supóngase que el decisor compara unos criterios  $C_j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) para establecer unas prioridades  $w_j$  (pesos asociados a los criterios). La comparación se expresa mediante la matriz  $W$  y se quiere encontrar un vector de prioridades  $\vec{w} = [w_1, w_2, \dots, w_n]$ . Entonces se plantea la siguiente ecuación:

$$\begin{pmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \cdots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \cdots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \cdots & w_n/w_n \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix} = \mu \cdot \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix} \quad (\text{II.63})$$

Donde:

- $w_j$  es la magnitud que se mide: pesos de los criterios
- Los elementos de la matriz  $W = (w_{ij})$  con  $w_{ij} = w_i/w_j$  para  $i, j = 1, 2, \dots, n$  son números positivos.

La matriz  $W$  tiene una forma especial, pues su rango es igual a 1 debido a que cada fila es múltiplo constante de la primera. Por ello esta matriz tiene un único autovalor distinto de cero. La ecuación anterior se puede poner de la forma  $W \cdot \vec{w} = \mu \cdot \vec{w}$ . El autovalor de  $W$  distinto de cero es igual a la dimensión  $n$  de la matriz y  $\vec{w}$  es el vector propio asociado.

Se puede observar que la suma de los elementos de la matriz  $W$  para la fila  $i$  se:

$$w_i \cdot \sum_{j=1}^n \frac{1}{w_j}$$

Y la suma de los elementos de la matriz para la columna  $j$  se puede escribir:

$$\frac{1}{w_j} \cdot \sum_{i=1}^n w_i = \frac{1}{w_j}$$

Por tanto si se normaliza la suma de columnas se obtiene el vector  $\vec{w}$ . Esta característica de  $W$  se utiliza en el análisis de perturbaciones.

Hay que destacar también que cada columna de la matriz  $W$  es múltiplo constante de  $\vec{w}$ . Así,  $\vec{w}$  se puede encontrar mediante la normalización de cualquier columna de  $W$ . Además, se dice que  $W$  es consistente porque satisface la condición  $w_{ik} \cdot w_{kj} = w_{ij}$  para todo  $i, j, k$ .

Tabla II.5: Escala fundamental de comparación pareada [277]

ESCALA FUNDAMENTAL DE COMPARACION PAREADA		
Escala numérica	Escala verbal	Explicación
1	Igual importancia	Dos actividades contribuyen por igual al objetivo
3	Importancia moderada de un elemento sobre otro	La experiencia y el juicio están a favor de un elemento sobre otro
5	Importancia fuerte de un elemento sobre otro	Un elemento es fuertemente favorecido
7	Importancia muy fuerte de un elemento sobre otro	Un elemento es muy dominante
9	Extrema importancia de un elemento sobre otro	Un elemento es favorecido por al menos un orden de magnitud de diferencia
2,4,6,8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes	Se usan como compromiso entre dos juicios
Incrementos 0,1	Valores intermedios en incrementos	Utilización para graduación más fina de juicios

Cuando se pide al decisor que establezca las prioridades mediante comparación entre pares para determinar los pesos relativos de los criterios, lo que hace es construir una matriz  $R$  cuyos elementos  $r_{ij}$  son valores numéricos positivos que indican la importancia o prioridad relativa entre el criterio  $C_i$  y el criterio  $C_j$  respecto al elemento del nivel inmediatamente superior en la jerarquía del problema, que en este caso es la meta u objetivo. Para determinar esta importancia se recurre a escalas previamente establecidas, de las cuales destaca la *escala fundamental* propuesta por Saaty. Según Saaty [277], este tipo de

escalas son esenciales para representar una prioridad o importancia relativa. El método AHP toma pares de elementos que se encuentran en un mismo nivel de una jerarquía y los compara en base a una determinada prioridad de un nivel superior, sin tener en cuenta otras prioridades ni otros elementos. Consecuencia de esta comparación surge una prioridad relativa de los objetos respecto a esa prioridad, cuya medida está basada en una escala ratio. La escala de comparación pareada sugerida es la de la Tabla II.5.

Estos números de la escala representan la proporción en la que uno de los elementos que se consideran en la comparación pareada domina al otro respecto a una propiedad o criterio que tienen en común. El elemento menor tiene el valor recíproco o inverso respecto al mayor, es decir, si  $x$  es el número de veces que un elemento domina a otro, entonces este último es  $x^{-1}$  veces dominado por el primero, de tal modo que  $x^{-1} \cdot x = x \cdot x^{-1} = 1$ . Este es el principio del axioma de comparación recíproca que ya se ha comentado.

Para determinar los pesos de los criterios el decisor, haciendo uso de la escala fundamental, debe completar la matriz  $R$ , de tal modo que el término  $r_{ij}$  representa la prioridad relativa entre el criterio  $C_i$  y el criterio  $C_j$  respecto a la meta del problema. Este término será mayor, igual o inferior a uno dependiendo de cual de los dos criterios sea más importante para el logro de la meta. La matriz obtenida es de la forma:

$$R = \begin{pmatrix} 1 & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & 1 & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & 1 \end{pmatrix}$$

Donde  $r_{ij} \cdot r_{ji} = 1$ . Una matriz con esta propiedad es denominada *matriz recíproca*. Para este tipo de matrices se cumple que el autovalor máximo  $\lambda_{\max}$  es un número real positivo y que existe el un vector propio  $\vec{Z}$ , cuyas componentes son positivas, asociado a este autovalor. Posteriormente se normaliza este autovector para que la suma sea la unidad.

Una vez establecida la matriz  $R$ , ésta concibe como una perturbación de la matriz  $W$  y se considera que el vector propio  $\vec{Z}$  es una aproximación al vector de prioridades  $\vec{w}$ . Por tanto, para determinar los pesos  $w_j$  bastará calcular el autovector asociado al autovalor máximo de la matriz  $R$ . Este proceso de cálculo es sencillo hoy en día con las herramientas informáticas que existen, no obstante, cuando el tiempo lo requiera, se pueden aproximar el vector  $\vec{w}$  mediante la suma normalizada de las filas de la matriz  $R$  según la expresión:

$$\frac{\sum_j r_{ij}}{\sum_i \sum_j r_{ij}}$$

Otra aproximación puede ser la inversa de la suma de columnas:

$$\left( \sum_{i=1}^n r_{ij} \right)^{-1}$$

También normalizada, de forma que la suma sea la unidad.

Asimismo otra manera de obtener el vector de pesos de la matriz sería mediante el cálculo de la media geométrica normalizada, que es el que vamos aplicar en nuestro ejemplo, como:

$$\frac{\prod_j r_{ij}}{\sum_i \prod_j r_{ij}}$$

Como forma de calcular el autovector consiste en elevar la matriz de comparaciones pareadas a potencias sucesivas, sumar las filas y normalizar de forma que la suma sea la unidad. De este modo los vectores convergen. En función de la precisión en decimales que se deseen, podemos alargar el proceso de iteración.

Para que la aplicación de las comparaciones por pares arroje resultados adecuados, es necesario que en el proceso de comparación por pares el decisor haya sido cuidadoso con las valoraciones, ya que un error de incoherencia genera una matriz de la que se obtiene un autovalor poco representativo. Esto se produce, por ejemplo, cuando se genera una contradicción al incumplir la transitividad de los valores. Supongamos que hemos hecho unas valoraciones en las que representamos que  $C_1 > C_2$  y  $C_2 > C_3$ . Por transitividad se obtiene que  $C_1 > C_3$ . Pero puede ser que al comparar por separado hayamos juzgado que  $C_3 > C_1$ . Se dice que una matriz es totalmente consistente si verifica que  $r_{ij} \cdot r_{jk} = r_{ik} \quad \forall i, j, k$ .

Existen varias formas de detectar la inconsistencia de la matriz y medir la consistencia de los juicios emitidos. Una de ellas consiste en resolver, tras construir la matriz  $R$ , la ecuación

$$R \cdot \bar{w} = \lambda_{\max} \cdot \bar{w} \quad (\text{II.64})$$

Cuanto más próximo esté el valor  $\lambda_{\max}$  a  $n$ , siendo  $n$  la dimensión de la matriz, mayor es la consistencia de los juicios. El resto de autovalores de  $R$  deben estar próximos a cero. Pero no siempre es posible obtener por parte del evaluador una coherencia total en sus juicios que  $\lambda_{\max}$  sea igual a  $n$ . Esto se debe tanto al propio decisor como a la escala de valoración, cuando esto sucede es necesario construir una función para medir la consistencia de los juicios. La consistencia se puede medir mediante el *índice de consistencia* ( $CI$ ), que tiene la siguiente expresión:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (\text{II.65})$$

Esta medida puede utilizarse para mejorar la consistencia de los juicios si se compara con el número apropiado de la tabla que se presenta a continuación, que recoge el índice de *consistencia aleatorio* (*RI*):

Tabla II.6: Índice de consistencia aleatorio (RI) en función de la dimensión de la matriz (n)

n	1	2	3	4	5	6	7	8
RI	0	0	0.525	0.882	1.115	1.252	1.341	1.404
n	9	10	11	12	13	14	15	16
RI	1.452	1.484	1.513	1.535	1.555	1.570	1.583	1.595

El índice de consistencia aleatorio (RI) se define como el índice de consistencia aleatorio medio obtenido mediante la simulación de 100.000 matrices recíprocas [6] generadas aleatoriamente utilizando la escala de Saaty (1/9, 1/8, ..., 1, ..., 8, 9).

Si se calcula el cociente entre el índice de consistencia (CI) y el índice de consistencia aleatorio (RI), se obtiene el denominado *ratio de consistencia* (*CR*).

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (\text{II.66})$$

Si este cociente vale 0,10 ó menos, entonces se acepta la consistencia de la matriz y por tanto el autovector de pesos se admite como válido. Para  $n=3$  el umbral se fija en 0,05 y para  $n=4$  en 0,08. Para  $n \geq 5$ , si CR es mayor que 0,10 se debe estudiar el de nuevo el problema y revisar los juicios emitidos.

Una vez calculado el vector de prioridades  $\vec{w} = [w_1, w_2, \dots, w_n]$  (bien calculando  $\lambda_{\max}$  y el vector propio  $\vec{Z}$  asociado, bien de una manera aproximada), se analizan los resultados y se establece definitivamente el vector  $\vec{w}$ .

### **Paso 3: Establecimiento de las prioridades locales y globales entre los subcriterios**

Si en la modelización del problema de decisión como una jerarquía se ha considerado la descomposición de algunos o todos los criterios en subcriterios, antes de continuar debe calcularse el vector de pesos global asociado a dicho subcriterios.

El procedimiento es el mismo que el descrito en el paso anterior, pero en este caso se deberán realizar las comparaciones pareadas entre subcriterios para determinar su importancia relativa respecto al criterio inmediatamente superior en la jerarquía. De este modo, es posible calcular el vector de pesos asociados a un conjunto de subcriterios respecto a su criterio "padre". Es lo que se ha denominado prioridad local.

Una vez calculada la importancia relativa de los criterios respecto a la meta del problema, en el paso 2, y la importancia relativa de los subcriterios respecto al criterio del que dependen, para calcular la importancia relativa global de cada subcriterio respecto a la meta del problema bastará calcular el producto de los diferentes pesos de cada uno de los criterios y subcriterios que se recorran en la

jerarquía desde el subcriterio del que se quiere calcular su peso hasta la cúspide de la jerarquía, procedimiento que se denomina composición jerárquica.

**Paso 4: Establecimiento de las prioridades locales entre las alternativas**

Una vez obtenida la ponderación de los criterios y subcriterios en los pasos anteriores, se procede a la valoración de las alternativas para así poder calcular las prioridades locales correspondientes. Para ello, con cada criterio o subcriterio del último nivel de la jerarquía se plantea la matriz  $R$  de juicios por comparación pareada entre alternativas. El procedimiento es el mismo que explicado en el paso 2, pero esta vez se establece el nivel de prioridad de una alternativa sobre otra tomando como base de comparación el grado de cumplimiento o satisfacción de cada criterio o subcriterio. La escala a utilizar es la misma también.

Una vez planteada la matriz  $R$  de comparación entre alternativas, se procede como ya se ha comentado: se calcula el autovalor máximo de la matriz  $R$ , el vector propio asociado, y el índice de consistencia de los juicios. Una vez realizadas estas operaciones, si el índice de consistencia es aceptable, para cada criterio o subcriterio se obtiene un vector de pesos locales de las alternativas, que corresponde con el autovector calculado. Toda esta información, junto con los pesos de los criterios o subcriterios calculados anteriormente, se puede presentar en al siguiente matriz, que recibe el nombre de matriz de valoración:

Tabla II.7: Matriz de valoración

	$w_1$	$w_2$	...	$w_j$	...	$w_n$
	$C_1$	$C_2$	...	$C_j$	...	$C_n$
$A_1$	$x_{11}$	$x_{12}$	...	...	...	$x_{1n}$
$A_2$	$x_{21}$	$x_{22}$	...	...	...	$x_{2n}$
...	...	...	...	...	...	...
$A_i$	$x_{i1}$	$x_{i2}$	...	$x_{ij}$	...	$x_{in}$
...	...	...	...	...	...	...
$A_m$	$x_{m1}$	$x_{m2}$	...	$x_{mj}$	...	$x_{mn}$

Donde:

- $\vec{w} = [w_1, w_2, \dots, w_n]$  es el vector de pesos o prioridades relativas asociado a los criterios o subcriterios
- $\vec{x}_j = \begin{pmatrix} x_{1j} \\ x_{2j} \\ \dots \\ x_{mj} \end{pmatrix}$  es el vector de prioridades locales de las alternativas

establecidas en base al criterio o subcriterio  $C_j$ .

- $\vec{x}_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}]$  es el vector de prioridades locales asociado a la alternativa  $A_i$ , cuyas componentes son las prioridades locales asociadas a esta alternativa según cada uno de los criterios.

### Paso 5: Establecimiento de las prioridades totales asociadas a cada alternativa.

Cuando se dispone de toda la información de la matriz de valoración, para finalizar el método AHP, solo resta aplicar cualquiera de los métodos de la bibliografía para calcular las prioridades totales asociadas a cada alternativa, que representan la importancia de las alternativas con respecto a la meta.

Saaty propone que el método a utilizar sea el método de la suma ponderada. Como ya se comentó, es un método basado en una función valor y parte del principio de valorar la adición de buenas valoraciones como argumento para seleccionar una alternativa. También se podrían emplear métodos de sobreclasificación, como ELECTRE y PROMETHEE, pero la propuesta de Saaty es más sencilla.

Recordemos el procedimiento del método de la suma ponderada. El objetivo es encontrar el vector global  $\vec{p}$  de prioridades que agrega las prioridades obtenidas en las dos jerarquías consideradas: criterios y alternativas. Las componentes  $p_i$  de este vector son las prioridades totales asociadas a cada alternativa  $A_i$ , que reflejan el valor total que cada alternativa tiene para el decisor. Cada componente de este vector se calcula según la expresión:

$$p_i = \sum_{j=1}^n (w_j \cdot r_{ij}) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (\text{II.67})$$

donde  $w_j$  son los pesos asociados a cada uno de los criterios que se consideran y  $r_{ij}$  son las componentes de la matriz de valoración tras el proceso de normalización. Finalmente, por ordenación de las alternativas en base a los valores  $p_1, p_2, \dots, p_m$  es posible resolver el problema de decisión y determinar la mejor alternativa de entre las posibles, que será la de suma ponderada mayor.

### Paso 7: Análisis de sensibilidad

Como último paso de la metodología AHP puede realizarse un análisis de sensibilidad que confirme que realmente los resultados obtenidos son robustos y no son fruto del azar.

La realización de este análisis puede facilitarse y agilizarse si se emplea para ello herramientas informáticas de cálculo. El software *Expert Choice*<sup>®</sup>, uno de los principales paquetes informáticos que implementa la metodología AHP, permite realizar el análisis de sensibilidad de cinco formas diferentes: *sensibilidad de valoración*, *sensibilidad dinámica*, *sensibilidad de gradiente*, *gráfico en dos dimensiones* y *sensibilidad de diferencias ponderadas*. En todos estos análisis el procedimiento es el mismo: se realizan variaciones en el valor de un peso (no mayores al 10%) y se observa numérica y gráficamente cómo este cambio afecta al resto de pesos del problema y a la priorización de alternativas. La diferencia entre un análisis de sensibilidad y otro se reduce a la forma de representar la información.

#### II.2.2.4. AHP EN GRUPO

La metodología expuesta constituye el procedimiento básico del método AHP. Sin embargo, es importante comentar una situación que suele darse en muchas decisiones y cuya versión lo complementa.

Esta situación es la toma de decisión en grupo, como es el caso de la presente tesis doctoral. En este caso, la unidad decisora está formada por más de una entidad, es decir, es un conjunto de individuos interesados en el proceso de decisión, de tal forma que tiene que adoptar una solución única que refleje globalmente las opiniones o intereses del grupo.

La forma de integrar las valoraciones de cada experto para obtener la solución única se puede realizar mediante diferentes técnicas. Se ha comprobado que hacer la media geométrica de las valoraciones es un procedimiento aceptable, sencillo y rápido. Además, la media geométrica cumple las condiciones de simetría (la valoración global no varía si dos valoraciones individuales se intercambian), de acuerdo (si todos los individuos están de acuerdo, la opinión global también) y de homogeneidad lineal (si cada miembro del grupo multiplica su valoración por una constante, la preferencia el grupo también se multiplica por dicha constante). La media aritmética también podría emplearse porque satisface dichas condiciones, pero no cumple la reciprocidad y separabilidad que sí posee la media geométrica.

Por ello en función del momento en que se realiza la agregación de la información de los expertos se utilizará una técnica u otra, como veremos posteriormente en el Bloque III.

#### II.2.2.5. VENTAJAS E INCONVENIENTES DEL AHP

En todas las técnicas de decisión multicriterio se pueden encontrar aspectos positivos y negativos, bien desde un punto de vista teórico o bien desde la práctica. Algunas de las ventajas del método AHP son:

- *Teoría:* El AHP es una de las pocas técnicas multicriterio que ofrece una axiomática teórica.
- *Práctica:* El AHP es una de las técnicas multicriterio que mejor comportamiento práctico tiene.
- *Unidad:* El AHP proporciona un modelo único fácilmente comprensible, flexible, para una amplia gama de problemas estructurados.
- *Complejidad:* El AHP integra enfoques deductivos y de sistemas para resolver problemas complejos.
- *Estructura jerárquica:* El AHP refleja la tendencia natural de la mente a clasificar elementos de un sistema en diferentes niveles y a agrupar elementos similares en cada nivel.
- *Medida:* El AHP proporciona una escala para medir imponderables y un método para esclarecer prioridades.

- *Síntesis*: El AHP conduce a una estimación completa de la conveniencia de cada alternativa.
- *Compensaciones*: El AHP toma en consideración las prioridades relativas de los factores en un sistema y permite seleccionar la mejor alternativa en virtud de objetivos.
- *Juicio y consenso*: El AHP no insiste en el consenso, pero sintetiza un resultado representativo de diversos juicios.
- *Repetición del proceso*: El AHP permite que la gente afine su definición de un problema y mejore su juicio y comprensión mediante la repetición del proceso.

No obstante, el método AHP también representa una serie de inconvenientes, como se cita a continuación:

- La justificación de la independencia exigida en la modelización jerárquica.
- La escala fundamental empleada para expresar los juicios relativos en las comparaciones pareadas.
- Los procedimientos de priorización de los elementos mediante el cálculo del autovector.
- La forma de evaluar la consistencia de los juicios emitidos.
- La interpretación de las prioridades totales obtenidas en el procedimiento.
- La introducción de una nueva alternativa puede hacer variar la estructura de preferencias del decisor, o poner de manifiesto alguna inconsistencia en los juicios.

#### II.2.2.6. REVISIÓN DE LA LITERATURA DEL AHP

Finalmente podemos citar algunas de las aplicaciones del método AHP. Las principales causas de la gran aplicabilidad de este método son: su flexibilidad técnica, su adecuación a numerosas situaciones reales referidas a la selección multicriterio entre alternativas, su facilidad de uso, la posibilidad de realizar valoraciones unipersonales o en grupo y la existencia de software intuitivo para su aplicación, como *Expert Choice*<sup>®</sup>.

El AHP ha sido estudiado y utilizado en casi todos los campos relacionados con la toma de decisión multicriterio (MCDM), como lo mostraron primeramente Vargas [314] haciendo una revisión de las aplicaciones del método AHP en los años 80 y posteriormente, Vaidya y Kumar [313] con las investigaciones realizadas desde 1998 hasta 2008, quienes presentaron un total de 150 artículos en los cuales se aplicó el método AHP en diversos campos como Social, Fabricación, Política, Ingeniería, Educación, Industria, Gobierno y otras, en las cuales se han desarrollado aplicaciones en las siguientes áreas Selección, Evaluación, Análisis coste-beneficio, Asignación, Planeamiento y desarrollo, Prioridad y ranking, Toma de decisión, Predicción y Salud. Sin embargo, un

área donde ha tenido gran éxito es en Gestión de Proyectos [10] debido a que son los gerentes de las empresas y los directores de proyectos los que deben tomar decisiones en esta área; Bertolini, Braglia y Carmignani [33], presenta la aplicación de la metodología de AHP en la construcción de una oferta de trabajo público, en el cual el decisor debe seleccionar el mejor descuento que se puede ofrecer en una oferta de contratos públicos en una compañía que adorna jardines y estructuras de parques. Esta característica es importante, porque el único parámetro importante para ganar el contrato es el descuento ofrecido de acuerdo al precio de la oferta. Sin embargo, la definición del descuento es un proceso crítico que implica la evaluación de muchas variables y aspectos. Por esta razón, una herramienta de toma de decisión es muy importante, porque este porcentaje generalmente, sólo se obtiene con la experiencia y el juicio de personas expertas en el área.

Un área en la cual se han realizado diversidad de aplicaciones y sobre la cual se plantea una gran problemática actualmente, es el área ambiental, debido a la complejidad de los problemas, en los cuales se realiza planificación de políticas, estrategias y se evalúan impactos, contaminación, uso eficiente de aguas, tierras, energía, en este sentido Feng, Tzeng y Hsiung [122] presentan la aplicación del modelo de toma de decisión multicriterio AHP, para analizar la problemática de las emisiones de gases y la contaminación producida por estos, proponen un modelo para determinar estrategias para disminuir la emisión de gases en los hogares, el sector del transporte centrándose en la innovación de la tecnología, sustitución de los modos del transporte, gestión del sistema de transporte, ajuste del transporte y su relación con la forma de vida y la estructura urbana del desarrollo. Igualmente Ávila [22], presenta un informe técnico de la aplicación del modelo AHP para la toma de decisión en un caso relacionado específicamente con el uso de las tierras, con la participación de múltiples actores. Otra área en la que se ha realizado muchos trabajos es la relacionada con la evaluación y selección, debido a la diversidad y globalización del mercado, en el cual los productos están cada vez más al alcance de todos ya sean en almacenes, tiendas, catálogos o por medios virtuales en los cuales muchas veces las personas no pueden acceder al producto y los cuales las empresas están invirtiendo grandes sumas de dinero, es cada vez más necesario tener un sistema de toma de decisión que le permita al decisor elegir y evaluar entre las alternativas del mercado la que mejor se ajuste a sus necesidades y le permita agregar valor a su empresa. En este sentido, Wei, Chien y Wang [334] presentan una aproximación basada en AHP en la selección de un sistema ERP para una empresa. Ossadnik y Lange [251] presentan una aplicación del modelo AHP, para evaluar tres productos de software (AutoMan, ECPRo y HIPRE+), que permiten implementar el método AHP, esto es importante porque los diferentes productos de software que existen en el mercado permiten implementar la toma de decisión multicriterio, estos productos permiten obtener la validez de los juicios y graficar las diferentes soluciones, sin embargo, existen diferencias entre ellos los cuales se ajustan a diferentes tipos de problemas.

Sin embargo, el AHP ha venido ganando terreno en áreas de gran importancia en las cuales los decisores no son gerentes, ni líderes que deben tomar decisiones que les permitan adquirir un conocimiento para realizar las tareas para las cuales son diseñados y que cada vez involucran más criterios e incertidumbres, en un tiempo menor que con las técnicas tradicionales, en esta área.

Esta gran diversidad de aplicaciones, se debe en gran parte a la simplicidad, facilidad de empleo, y gran flexibilidad del método lo cual permite combinarlo fácilmente con otras técnicas de toma de decisión multicriterio, con lo cual se espera que se obtengan mejores resultados, esto es importante, porque los problemas a los que las empresas y los decisores se ven enfrentados todos los días no son los mismos, debido a la gran dinámica en la que las empresas en general se desenvuelven, esto obliga a que cada día se optimicen, mejoren y combinen diferentes métodos con el fin de obtener resultados más satisfactorios, en este sentido Ho [151] hace una revisión de las aplicaciones del modelo AHP integrado a otras técnicas, desde 1997 hasta 2006. Las técnicas con las cuales se integró el método AHP son: programación matemática, Despliegue de la función de calidad (QFD), meta-heurística, análisis de SWOT (*Siglas de Weaknesses (Debilidades), Threats (Amenazas), Strengths (Fortalezas) y Opportunities (Oportunidades) Análisis DAFO*) y Análisis Envolverte de Datos (DEA), estos se implementaron en diversas áreas como Logística, Negocios, Medio ambiente, Fabricación, Educación, Militar, Gobierno, Mercado, Salud, Servicios, Industria, Deporte y Turismo y en una gran diversidad de aplicaciones como son Selección de Dispositivos, Selección de tecnologías, Selección de costes, Selección de proyectos, Selección de oferta, Selección de cosechas, Selección del ciclo de un combustible nuclear, Selección de métodos de datos del cliente, Selección de tecnología de fabricación, Selección de medios de publicidad, Selección de estrategias de mantenimiento, Selección de requerimientos, Selección de métodos de enseñanza, Selección de diseños de producto, Selección de presupuesto, Selección de facilidad de localización, Selección de reglas de juego, Selección de herramientas, Selección de horarios, Selección de rutas de transporte, Evaluación y Asignación.

La mayoría de problemas de toma de decisión multicriterio, presentan múltiples criterios los cuales pueden ser cuantitativos pero también se presentan criterios cualitativos, por esta razón, los métodos multicriterio vistos por si solos, han resultado ineficientes para resolver este tipo de problemas, es así como ha surgido la necesidad de implementar métodos híbridos que permitan combinar las bondades del modelo analítico jerárquico con la lógica difusa. Esto permite manejar de forma adecuada, tanto los criterios cuantitativos como los cualitativos, lo que permite un mayor acercamiento a la forma en que los humanos toman las decisiones, lo cual genera un modelo para resolver los problemas más cercano al mundo real, aunque se debe tener cuidado al obtener el vector propio para el AHP a través de la matriz de comparación triangular difusa porque puede presentar inconsistencias como lo apuntan Wang, Luo y Hua [328].

Tabla II.8. Revisión bibliográfica del AHP

Áreas Aplicación	Selección	Evaluación	Análisis Coste-Beneficio	Asignación	Planeamiento y desarrollo	Prioridad y Ranking	Toma de decisiones	QFD
<b>Personal</b>	[10;59;137] [285;286;301]	[62;145;239]	[262]	[188]	[337]	[12;39;55] [112;127;281]	[94;99;107] [87;144;265]	[54;363]
<b>Social</b>	[7;85;175] [147;189;352] [243]	[190;192;283] [336]	[23]	[274]	[93;115;183] [208]	[93]	[335]	[20]
<b>Fabricación</b>	[161;233;320] [50;77;351] [34;116]	[181;299;331] [9;291;319] [47]	[18;286]	[13;14;37]		[48;143;200] [168;298]	[71;76;330]	[253;321;363] [154;198;199] [36;146]
<b>Política</b>	[67;123;194] [167]			[26;250]				
<b>Ingeniería</b>	[138;162;173] [201;202;238] [284]	[8;251;287] [110]		[260]	[177;186;234] [136;258;298]	[111;326]	[1;35;158] [180]	[240]
<b>Educación</b>	[176]	[53;126;255] [125]		[196;252]			[231]	[184;204]
<b>Industria</b>	[65;242;246] [132;135;139]	[124]	[332]		[84;210;347]	[11;25;26] [129;296]	[97;212;338]	
<b>Gobierno</b>	[155;226;259]	[86;256;300] [214;302;312] [63]	[259;273]	[140]	[96;297]	[232]	[144;280]	
<b>Logística</b>	[188;191;311] [66;187;368] [69;72;73] [70;74;75] [207]							[92;120]
<b>Medioambiente</b>		[195;227]	[22]			[52;245]	[169;244]	[225]
<b>Defensa</b>	[179]	[96;235]						[254]
<b>Medicina</b>	[68]	[267;293]				[197;271]	[217;218;247]	

Este tipo de aplicaciones híbridas como es el caso del AHP difuso, han empezado a tener gran aceptación, en el área de la Administración por ejemplo [33], el capital humano constituye un activo importante y esencial en una organización porque contribuye enormemente al desarrollo y al crecimiento de la compañía, en la cual cada empleado aporta sus actitudes, habilidades y capacidades. Esta es la razón por la cual el capital humano (HC) se puede considerara como un subnivel del capital intelectual. Pero una dificultad que se presenta, es que el capital humano no se puede medir, porque en gran medida depende de conceptos subjetivos no cuantitativos por eso Bozbura, Beskese y Kahraman [46], presentan una metodología para mejorar la calidad de priorización de los indicadores de medida del capital humano, desde el punto de vista de la lógica difusa y una estructura jerárquica como es el AHP.

### II.2.2.7. AHP DIFUSO

El AHP difuso es una extensión de la metodología AHP mediante la combinación de la teoría de conjuntos difusos, teniendo en cuenta las operaciones matemáticas que se derivan de esta teoría ver epígrafe II.2.2.1 Lógica Difusa

En nuestro caso utilizaremos esta extensión de la metodología AHP para la determinación del peso de los criterios en nuestro problema de evaluación de alternativas.

## II.2.3. EL MÉTODO TOPSIS

### II.2.3.1. EL CONCEPTO DE ALTERNATIVA IDEAL

El concepto de alternativa ideal tiene una larga tradición en diversos campos científicos, especialmente en la literatura psicométrica, en donde se maneja una noción absoluta de ideal [95]. Pero es Zeleny [364] quien lo erige en pieza central de su propuesta de *solución de compromiso*, en el sentido de la alternativa más *próxima* al ideal. Para Zeleny [365] el concepto de ideal y de solución de compromiso incluso es una hipótesis sobre la racionalidad subyacente en los procesos humanos de decisión. El concepto se ha difundido desde entonces, pasando a otros campos como el de las decisiones en grupo [349].

Pero es en el método TOPSIS donde se contemplan las sutilezas que el concepto de ideal tiene y se construye un método operativo. [29].

Formalicemos algunas definiciones básicas. Partimos, de tener unas alternativas  $A_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$  y una matriz de decisión, con  $x_{ij} = U_j(A_i)$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ . Donde  $U$  es la función utilidad del decisor. Podemos, sin perdida de generalidad, transformar las utilidades de manera que todos los criterios sean a maximizar/minimizar y que todos los  $x_{ij} > 0$ .

**Definición II.17:** Se denomina *punto ideal* en  $(\mathfrak{R}^n)$  al punto  $A^M = (A_1^M, A_2^M, \dots, A_n^M)$ , donde  $A_i^M = \text{Max}_i x_{ij}$ . para el caso de criterios de

beneficio y  $A_i^m = \text{Min}_i x_{ij}$  para el caso de criterios de coste. La alternativa  $A^M$  se llama *alternativa ideal*.

**Definición II.18:** Se denomina punto anti-ideal en  $(\mathfrak{R}^n)$  al punto  $A^m = (A_1^m, A_2^m, \dots, A_n^m)$ , donde  $A_i^m = \text{Min}_i x_{ij}$ , para el caso de criterios de beneficio y  $A_i^M = \text{Max}_i x_{ij}$  para el caso de criterios de coste. La alternativa  $A^m$  se llama *alternativa anti-ideal*.

II.2.3.2. EL MÉTODO TOPSIS

El método TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) de Hwang y Yoon [156] afronta el dilema de trabajar con el ideal, con el anti-ideal o con la mezcla de los dos. Para ver que esto es realmente un dilema, pues puede conducir a resultados diferentes, basta observar la siguiente figura, en la que se han representado cinco alternativas (A, B, C, D y E) para un problema de dos criterios. También aparecen en la figura los puntos ideal y anti-ideal, respecto a los que es inmediato observar que C es la más próxima al ideal mientras que D es la más lejana del anti-ideal (en ambos casos utilizando una métrica de distancia euclídea y pesos iguales).

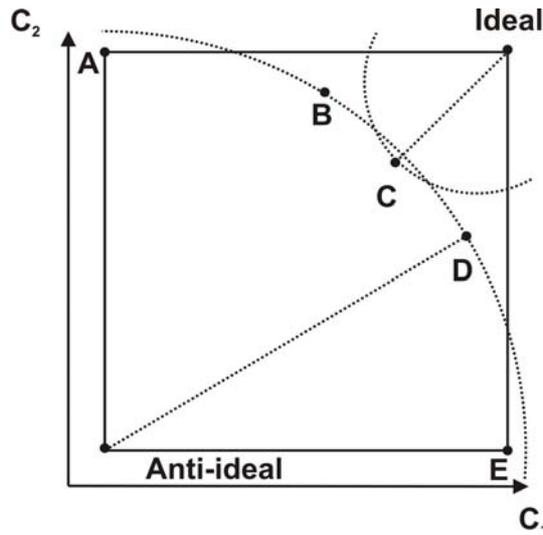


Figura II.21: Ilustración de distancias al ideal y al anti-ideal

TOPSIS resuelve el problema, inspirándose en una idea que Dasarathy [98] aplicó en un contexto de análisis multivariante de datos. Para cada alternativa  $A_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$ , se calculan

$d_p^M(A_i)$  y  $d_p^m(A_i)$ , las distancias ponderadas al ideal y al anti-ideal según la métrica  $p$  escogida:

$$d_p^M(A_i) = \left[ \sum_j w_j^p |A_j^M - x_{ij}|^p \right]^{1/p} \tag{II.68}$$

$$d_p^m(A_i) = \left[ \sum_j w_j^p |A_j^m - x_{ij}|^p \right]^{1/p} \tag{II.69}$$

A partir de (II.68) y (II.69), se obtiene el ratio de similiaridad al ideal:

$$D_p(A_i) = \frac{d_p^m(A_i)}{D_p^M(A_i) + d_p^m(A_i)} \quad (\text{II.70})$$

Que varía desde  $D_p(A^m) = 0$  para el anti-ideal, hasta  $D_p(A^M) = 1$  para el ideal. Finalmente,  $D_p(a_i)$  se utiliza para la ordenación final de las alternativas.

### II.2.3.3. ALGORITMO DEL MÉTODO TOPSIS

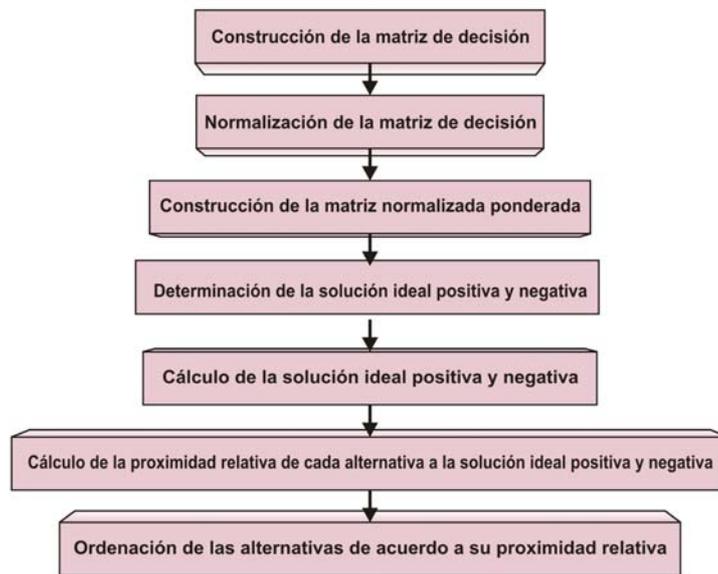


Figura II.22: Pasos el método TOPSIS

#### Paso 1: Establecimiento de la matriz de decisión

El método TOPSIS evalúa la siguiente matriz de decisión que se refiere a  $m$  alternativas  $A_i$ ,  $i = 1, \dots, m$ , las cuales son evaluadas en función de  $n$  criterios  $C_j$ .  $j = 1, \dots, n$ :

Tabla II.9: Matriz de decisión

	$w_1$	$w_2$	...	$w_j$	...	$w_n$
	$C_1$	$C_2$	...	$C_j$	...	$C_n$
$A_1$	$x_{11}$	$x_{12}$	...	$x_{1j}$	...	$x_{1n}$
$A_2$	$x_{21}$	$x_{22}$	...	$x_{2j}$	...	$x_{2n}$
...	...	...	...	...	...	...
$A_m$	$x_{m1}$	$x_{m2}$	...	$x_{mj}$	...	$x_{mn}$

Donde  $x_{ij}$  denota la valoración de la  $i$ -ésima alternativa en términos del  $j$ -ésimo criterio. Y donde  $W = [w_1, w_2, \dots, w_n]$  es el vector de pesos asociado con  $C_j$ .

## Paso 2: Normalización del matriz de decisión

En el método TOPSIS primero convierte las dimensiones de los distintos criterios en criterios no dimensionales. Un elemento  $\bar{n}_{ij}$  de la matriz de decisión normalizada  $N = [\bar{n}_{ij}]_{m \times n}$  se calcula como sigue:

$$\bar{n}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (x_{ij})^2}}, \quad j = 1, \dots, n; \quad i = 1, \dots, m. \quad (\text{II.71})$$

## Paso 3: Construir la matriz de decisión normalizada ponderada

El valor normalizado ponderado  $\bar{v}_{ij}$  de la matriz de decisión normalizada ponderada  $V = [\bar{v}_{ij}]_{m \times n}$  se calcula como:

$$\bar{v}_{ij} = w_j \otimes \bar{n}_{ij}, \quad j = 1, \dots, n, \quad i = 1, \dots, m, \quad (\text{II.72})$$

Donde,  $w_j$  tal que  $1 \in \sum_{j=1}^n w_j$  es el peso del j-ésimo atributo o criterio, si hablamos del caso crisp se verifica la igualdad. Es bien conocido que los pesos de los criterios en un problema de decisión no tienen el mismo significado y no todos tienen la misma importancia. Estos pesos pueden obtenerse de diferentes modos: mediante asignación directa, mediante el método AHP, etc. En la presente tesis como se ha comentado con anterioridad utilizaremos el método AHP para la obtención de los pesos en el ejemplo de aplicación que nos ocupa.

## Paso 4: Determinar la solución ideal positiva (PIS) y la solución ideal negativa (NIS)

El conjunto de valores ideal positivo  $\bar{A}^+$  y el conjunto de valores ideal negativo  $\bar{A}^-$  se determina como:

$$\bar{A}^+ = \{\bar{v}_1^+, \dots, \bar{v}_n^+\} = \left\{ \left( \max_i \bar{v}_{ij}, j \in J \right) \left( \min_i \bar{v}_{ij}, j \in J' \right) \right\} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (\text{II.73})$$

$$\bar{A}^- = \{\bar{v}_1^-, \dots, \bar{v}_n^-\} = \left\{ \left( \min_i \bar{v}_{ij}, j \in J \right) \left( \max_i \bar{v}_{ij}, j \in J' \right) \right\} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (\text{II.74})$$

Donde  $J$  está asociado con los criterios de beneficio y  $J'$  está asociado con los criterios de costes.

## Paso 5: Cálculo de las medidas de distancia

La separación de cada alternativa de la solución ideal positiva  $\bar{A}^+$  está dada como:

$$\bar{d}_i^+ = \left\{ \sum_{j=1}^n (\bar{v}_{ij} - \bar{v}_j^+)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad i = 1, \dots, m \quad (\text{II.75})$$

Y la separación de cada alternativa de la solución ideal negativa  $\bar{A}^-$  es como sigue:

$$\bar{d}_i^- = \left\{ \sum_{j=1}^n (\bar{v}_{ij} - \bar{v}_j^-)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad i = 1, \dots, m \quad (\text{II.76})$$

En este caso se utiliza la distancia Euclídea m-multidimensional.

### Paso 6: Cálculo de la proximidad relativa a la solución ideal

La proximidad relativa  $\bar{R}_i$  a la solución ideal puede expresarse como sigue:

$$\bar{R}_i = \frac{\bar{d}_i^-}{\bar{d}_i^+ + \bar{d}_i^-}, \quad i = 1, \dots, m \quad (\text{II.77})$$

- Si  $\bar{R}_i = 1 \rightarrow A_i = \bar{A}^+$
- Si  $\bar{R}_i = 0 \rightarrow A_i = \bar{A}^-$

Cuanto más próximo es el valor de  $\bar{R}_i$  a 1, implica una mayor prioridad de la alternativa i-ésima.

### Paso 7: Ordenación de preferencias

Se ordenan las mejores alternativas de acuerdo con  $\bar{R}_i$  en orden descendente.

## II.2.3.4. PROBLEMAS QUE SE PLANTEAN EN EL MÉTODO TOPSIS

### Efecto de la normalización

Uno de los pasos en TOPSIS para eliminar anomalías en las unidades y escalas es el proceso de normalización, de esta manera los criterios son adimensionales.

Una vez ubicada toda la información en la matriz de valoración, se dispone de los elementos suficientes para aplicar cualquiera de los métodos existentes en la bibliografía, que permiten calcular las prioridades totales asociadas a cada alternativa. Pero para ello es necesario primero comprobar que los criterios sean comparables entre sí.

Nuestra principal cuestión es si la normalización afecta al resultado final. La respuesta debería ser no pero esto no es así tal y como demostraremos:

Supongamos un ejemplo sencillo de tres candidatos a ocupar una cierta posición. Para ello, a cada uno de ellos se les ha pasado un cuestionario para su evaluación. Cada uno de los cuestionarios tiene el mismo peso  $w(C_1) = w(C_2) = 0.5$ . De acuerdo con esto, suponemos un problema multicriterio con tres alternativas y 2 criterios.

Sean los tres individuos  $A_1$ ,  $A_2$  y  $A_3$  cuyas valoraciones provienen de la escala  $\{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$ , donde  $5 > 4 > 3 > 2 > 1 > 0$ , estas son:  $x_{1j} = (1, 5)$ ,  $x_{2j} = (4, 2)$  y  $x_{3j} = (3, 3)$  para  $j = 1, 2$ .

Si aplicamos el criterio normativo de la esperanza matemática  $ME_i = \sum_{j=1}^2 w_j x_{ij}$ , podemos observar que las tres alternativas son igualmente satisfactorias para el decisor, porque:

$$EM_i = \frac{1 + 5}{2} = \frac{4 + 2}{2} = \frac{3 + 3}{2}$$

Entonces los tres individuos ocuparían la misma posición dentro del ranking. Veamos que ocurre al aplicar el método TOPSIS.

Tabla II.10: Algoritmo TOPSIS para el ejemplo a estudio

Pesos	0.5	0.5						
	$C_1$	$C_2$						
$A_1$	1	5	$n_1$	0.196	0.405	$v_1$	0.098	0.405
$A_2$	4	2	$n_2$	0.392	0.162	$v_2$	0.392	0.162
$A_3$	3	3	$n_3$	0.294	0.243	$v_3$	0.294	0.243
$\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{ij})^2}$	5.099	6.164				$A^+$	0.392	0.405
						$A^-$	0.098	0.162

						Ranking	
$d^+ A_1$	0.294	$d^- A_1$	0.243	$RA_1$	0.453	3	
$d^+ A_2$	0.243	$d^- A_2$	0.294	$RA_2$	0.547	1	
$d^+ A_3$	0.189	$d^- A_3$	0.212	$RA_3$	0.528	2	

Lo primero que llama la atención es que el tercer individuo, que tenía la misma valoración para los dos cuestionarios (3,3) al normalizar tiene diferente valoración. Esto es debido al proceso de normalización donde en un caso se ha dividido por 5.099 y en el otro por 6.164. De este modo una vez normalizada la matriz podemos obtener la matriz normalizada ponderada.

En el paso 4 del algoritmo TOPSIS, a la hora de determinar  $A^+$ , se podría interpretar este como una alternativa ficticia que se correspondería con el mejor valor de los existentes para cada uno de los criterios, en este caso sería la alternativa  $A_4 = (4,5)$ , que una vez normalizada y ponderada nos daría los valores  $A^+ = (0.392, 0.405)$ . Mientras que la  $A^-$ , se correspondería con la valoración de una hipotética alternativa valorada como  $A_5 = (1,2)$ , dándonos una vez normalizada y ponderada  $A^- = (0.098, 0.162)$ . Ver Tabla II.11.

Seguidamente se calculan los valores de  $d^+$  y  $d^-$  que se corresponden con las distancias euclídeas a las tres alternativas respecto a estas antes definidas respectivamente.

Finalmente se calcula el valor de la proximidad relativa según (II.77). Y la ordenación final de las alternativas sería  $A_2 > A_3 > A_1$ .

Con este método hemos sido capaces de pasar de una igualdad entre los tres candidatos a obtener una ordenación entre ellos.

## Inversión del orden

La inversión del orden es un fenómeno que ocurre cuando un decisor, en el proceso de selección de una alternativa de un conjunto de selección, se encuentra con una nueva alternativa que no se tuvo en cuenta al principio de la selección. Esta nueva alternativa puede hacer que tenga que volverse a calcular la evaluación de todas las alternativas.

La primera vez que aparece en la literatura el concepto de “independencia de alternativas irrelevantes” fue en Luce y Raiffa [223] en el axioma 7.

*Axioma 7:* Si una acción es no-óptima para un problema de decisión bajo incertidumbre (p.d.b.i.) esta no puede ser óptima añadiendo nuevas acciones al problema.

*Axioma 7':* La adición de nuevas acciones no pueden transformar una antigua acción, originariamente no-óptima, en una óptima, y no se puede cambiar una antigua acción, originariamente óptima en una no-óptima solo si al menos uno de las acciones es óptima.

*Axioma 7'':* La adición de nuevas acciones a un (p.d.b.i.) nunca cambia antiguas, originariamente acciones no-óptimas en óptimas y, además:

- a) Todas las antiguas, acciones originariamente óptimas permanecen óptimas o
- b) Ninguna de las antiguas, acciones originariamente óptimas permanecen óptimas

*Axioma 7''':* Una acción  $A'$  es óptima si y solo si es óptima en las comparaciones pareadas entre  $A'$  y  $A$ .

La inversión de orden es un fenómeno asociado con los resultados de la ordenación de alternativas al añadir/eliminar alternativas en un proceso de toma de decisión. Es bien conocido que cuando las alternativas están muy próximas, el orden entre ellas depende del método de evaluación utilizado.

Siguiendo con el ejemplo anteriormente planteado si añadimos una nueva alternativa  $A_4$ , para su evaluación y que su valoración sea  $A_4 = (5,1)$ . Igual que para los otros tres candidatos  $ME_4 = 3$ . Veamos que ocurre con el desarrollo del algoritmo TOPSIS para este caso. Ver tabla II.11.

Aplicando los mismos pasos que hemos hecho con anterioridad llegamos a que ahora al normalizar las valoraciones del tercer individuo pasan a ser  $(0.420, 0.480)$ . Es decir, ahora es el segundo cuestionario el que más vale, aunque partíamos de que  $w(C_1) = w(C_2) = 0.5$ . La razón se debe a que al introducir la cuarta alternativa los factores de normalización cambian siendo ahora  $(7.141, 6.245)$ .

Tabla II.11: Algoritmo TOPSIS para el ejemplo a estudio al que se ha añadido una nueva alternativa

Pesos	0.5	0.5						
	$C_1$	$C_2$						
$A_1$	1	5	$n_1$	0.140	0.801	$v_1$	0.070	0.400
$A_2$	4	2	$n_2$	0.560	0.320	$v_2$	0.280	0.160
$A_3$	3	3	$n_3$	0.420	0.480	$v_3$	0.210	0.240
$A_4$	5	1	$n_4$	0.700	0.160	$v_4$	0.350	0.080
$\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{ij})^2}$	7.141	6.245				$A^+$	0.350	0.400
						$A^-$	0.070	0.080

						Ranking
$d^+ A_1$	0.280	$d^- A_1$	0.320	$RA_1$	0.533	1
$d^+ A_2$	0.250	$d^- A_2$	0.225	$RA_2$	0.473	3
$d^+ A_3$	0.212	$d^- A_3$	0.213	$RA_3$	0.500	2
$d^+ A_4$	0.320	$d^- A_4$	0.280	$RA_4$	0.466	4

Podemos observar que ahora la primera alternativa que antes era la peor, pasa ahora a ser la mejor. Con esto, vemos que la introducción de una nueva alternativa cambia completamente el orden y en este caso no encontramos con una inversión de orden total.

No parece razonable que la posición del mejor candidato dependa del número de participantes en el proceso.

#### II.2.3.4. NUEVA APROXIMACIÓN AL MÉTODO TOPSIS

Para hallar una solución a los problemas que plantea el Método TOPSIS planteamos algunas modificaciones al algoritmo propuesto por Hwang y Yoon.

##### Modificaciones en la norma

Vamos a realizar un estudio de las principales formas de normalización existentes en la literatura [30;229;289] para ello a continuación se presenta un cuadro resumen de los principales procedimientos. Ver Tabla II.13.

El procedimiento que suele emplearse para normalizar las valoraciones de las alternativas en el método TOPSIS es el procedimiento 1, esta norma junto con la correspondiente al procedimiento 2 conservan la proporcionalidad, pero nos lleva a un MCDM que es contexto dependiente, ya que si añadimos una nueva alternativa al sistema hay que recalcular todos los datos.

Tabla II.12: Métodos de normalización

	Procedimiento 1	Procedimiento 2	Procedimiento 3	Procedimiento 4
Tipo	Normalización Vector	Normalización lineal	Normalización lineal	Normalización lineal
Definición	$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}$	$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}$	$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{ij}^{\max}}$ <p>Criterio de beneficio</p>	$r_{ij} = \frac{x_{ij}^{\max} - x_{ij}}{x_{ij}^{\max} - x_{ij}^{\min}}$ <p>Criterio de beneficio</p>
			$r_{ij} = \frac{x_{ij}^{\min}}{x_{ij}}$ <p>Criterio de coste</p>	$r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{ij}^{\min}}{x_{ij}^{\max} - x_{ij}^{\min}}$ <p>Criterio de coste</p>
Rango	$0 < r_{ij} < 1$	$0 < r_{ij} < 1$	$0 < r_{ij} \leq 1$	$0 \leq r_{ij} \leq 1$
Conserva la proporcionalidad	SI	SI	SI	NO
Interpretación	i-esima componente del vector unitario	% del total	% del máximo	% del rango
			% del mínimo	

Donde  $x_{ij}^{\max} = \max_i \{x_{ij}\}_{j=cte}$  y  $x_{ij}^{\min} = \min_i \{x_{ij}\}_{j=cte}$  ( $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ ).

Las normas correspondientes al procedimiento 4, representa el tanto por ciento del rango y no conserva la proporcionalidad, más bien la invierte. Pero esto no es un inconveniente ya que únicamente hay que invertir el proceso de decisión en el siguiente sentido.

- Si  $\bar{R}_i = 0 \rightarrow A_i = \bar{A}^+$
- Si  $\bar{R}_i = 1 \rightarrow A_i = \bar{A}^-$

Por tanto,  $A_i > A_j \Leftrightarrow R_i < R_j$

Asimismo en el procedimiento 4, nos podemos encontrar con casos en los que existe división por cero en el caso de utilizar números difusos. En general esto sucederá siempre que se verifique que el extremo inferior del máximo sea igual al extremo superior del mínimo. También hay problemas de valores negativos a la hora de utilizar números difuso, esto es, cuando nos encontramos con valores en el denominador menores que 0,  $x_{ij}^{\max} - x_{ij}^{\min} < 0$  que se producen por la propiedad de la operación de diferencia entre números difusos, (ver el epígrafe II.2.2.1. Lógica Difusa), que luego desvirtúan el número difuso. Por lo que es un procedimiento poco recomendado a utilizar con números difusos.

Por lo tanto viendo los problemas que plantean los procedimientos, 1,2 y 4, planteamos la utilización del procedimiento 3 en el segundo paso del algoritmo TOPSIS. Con lo que en vez de utilizar la norma propia del método TOPSIS, consideramos más apropiada la norma  $r_{ij} = x_{ij}/x_{ij}^{\max}$ , como seguidamente veremos.

Para la demostración consideramos el mismo ejemplo anterior y las mismas consideraciones, salvo el cambio de norma.

Tabla II.13: Algoritmo TOPSIS para el ejemplo a estudio con modificación de la norma

Pesos	0.5	0.5						
	$C_1$	$C_2$						
$A_1$	1	5	$n_1$	0.250	1.000	$v_1$	0.125	0.500
$A_2$	4	2	$n_2$	1.000	0.400	$v_2$	0.500	0.200
$A_3$	3	3	$n_3$	0.750	0.600	$v_3$	0.375	0.300
$x_{ij}^{\max}$	4	5				$A^+$	0.500	0.500
						$A^-$	0.125	0.200

Ranking						
$d^+ A_1$	0.375	$d^- A_1$	0.300	$RA_1$	0.444	3
$d^+ A_2$	0.300	$d^- A_2$	0.375	$RA_2$	0.555	1
$d^+ A_3$	0.235	$d^- A_3$	0.269	$RA_3$	0.534	2

En este caso,  $A^+ = (0.5, 0.5)$  y  $A^- = (0.125, 0.2)$ . Como resultado obtenemos como índice de proximidad  $R_1 = 0.444$ ,  $R_2 = 0.555$  y  $R_3 = 0.534$ , siendo la ordenación  $A_2 > A_3 > A_1$ , la misma que la obtenida con el método clásico.

*Proposición:* Es posible probar que, en todos los casos, los valores de  $A^+$  se corresponden con el vector de pesos asociado a los criterios

*Demostración:* Esto se debe a que para cada criterio, en la matriz de los valores normalizados siempre hay un 1, esto supone que al multiplicar por los pesos, estos se obtienen en los puntos donde se da este 1. De ahí que  $A^+$  sea el vector de pesos.

Entendemos que esto es una buena consecuencia del método y por lo tanto no queremos modificarlo.

Supongamos ahora, que se añade la nueva alternativa.  $A_4$ , el desarrollo del algoritmo con la modificación planteada se desarrolla en la Tabla II.14.

En este caso,  $A^+ = (0.5, 0.5)$  y  $A^- = (0.1, 0.1)$ . Como resultado obtenemos como índice de proximidad  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 0.500$ , así los cuatro candidatos tienen la misma ordenación  $A_1 = A_2 = A_3 = A_4$ . Por consiguiente tenemos inversión del orden.

Tabla II.14: Algoritmo TOPSIS para el ejemplo a estudio con modificación de la norma con inclusión de una nueva alternativa

Pesos	0.5	0.5							
	$C_1$	$C_2$							
$A_1$	1	5	$n_1$	0.200	1.000	$v_1$	0.100	0.500	
$A_2$	4	2	$n_2$	0.800	0.400	$v_2$	0.400	0.200	
$A_3$	3	3	$n_3$	0.600	0.600	$v_3$	0.300	0.300	
$A_4$	5	1	$n_4$	1.000	0.200	$v_4$	0.500	0.100	
$x_{ij}^{\max}$	5	5					$A^+$	0.500	0.500
							$A^-$	0.100	0.100

Ranking						
$d^+ A_1$	0.400	$d^- A_1$	0.400	$RA_1$	0.500	-
$d^+ A_2$	0.316	$d^- A_2$	0.316	$RA_2$	0.500	-
$d^+ A_3$	0.283	$d^- A_3$	0.283	$RA_3$	0.500	-
$d^+ A_4$	0.400	$d^- A_4$	0.400	$RA_4$	0.500	-

Luego, únicamente con la modificación de la norma no solucionamos el problema de la inversión de orden.

**Modificaciones en el PIS y el NIS**

Dado que el cambio en la normalización no es suficiente para solucionar el problema de la inversión de orden, proponemos otra modificación al método que está relacionada con la conceptualización del PIS y el NIS.

Dentro del concepto de alternativa ideal propuesto por el método TOPSIS vamos a considerar dos posibles variantes de este. La idea del Método TOPSIS está representada en las Figuras. II.23 a y b, donde tendríamos que evaluar la 5 alternativas (A,B,C,D,E), y donde por cuestiones relacionadas con la representación gráfica únicamente consideramos dos criterios. Así, la solución es una solución de compromiso de acuerdo con las preferencias del decisor. En base al concepto de que la alternativa elegida debe tener la distancia más corta a la solución ideal positiva PIS, en nuestro caso (C,D,E) y la más lejana de la solución ideal negativa NIS en nuestro caso (A,B;C).

En la Figura II.23.a representamos la concepción del PIS y el NIS de manera relativa y que se corresponde con el Método TOPSIS clásico.

Mientras que en la Figura II.23.b representamos la alternativa Ideal Positiva (como la mejor posible) y la ideal negativa (como la peor posible) en términos absolutos.

De este modo, entre todas las alternativas que tienen la misma distancia al PIS, elegiremos la alternativa que más se aleje de la línea recta que une PIS con NIS, en nuestro caso  $E > D > C$ . Por el contrario, entre todas las alternativas que tiene el mismo NIS, será mejor, en este sentido TOPSIS la de aquella que esté más próxima a la línea recta que une PIS-NIS, esto es  $C > B > A$ .

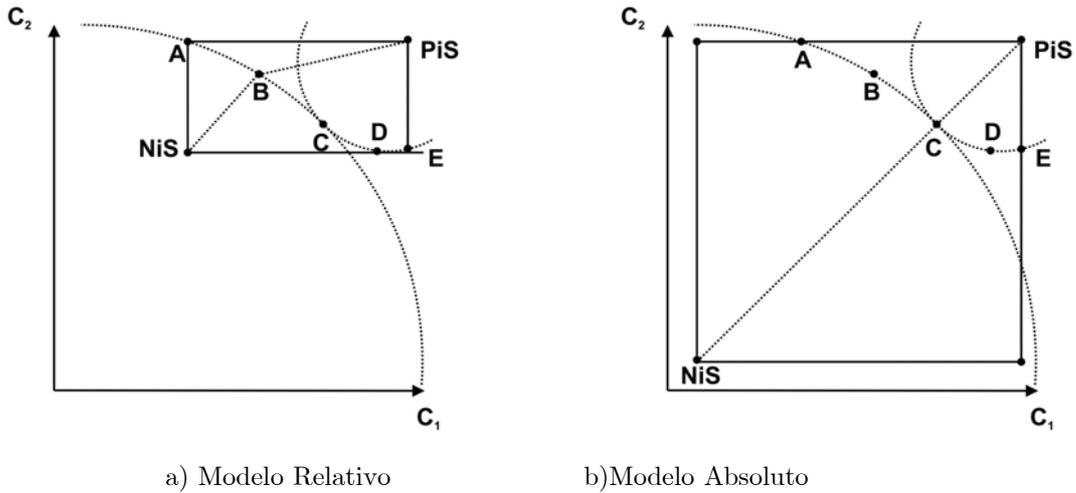


Figura II.23: Concepto PIS y NiS

Veamos ahora que ocurre en el ejemplo a estudio:

*Modo relativo*

El concepto puesto de manifiesto anteriormente es el de “relatividad”. Esto significa que elegimos como  $A^-$  aquellos valores que representan el mínimo valor de las 3 o  $n$  alternativas que estemos valorando, en nuestro caso será  $A^- = (0.125, 0.2)$ . De igual forma  $A^+ = (0.5, 0.5)$  será entendido como el máximo valor posible de las 3 alternativas. Los gráficos correspondientes a las Tablas II.14 y II.15 se corresponden con las Figuras II.24.

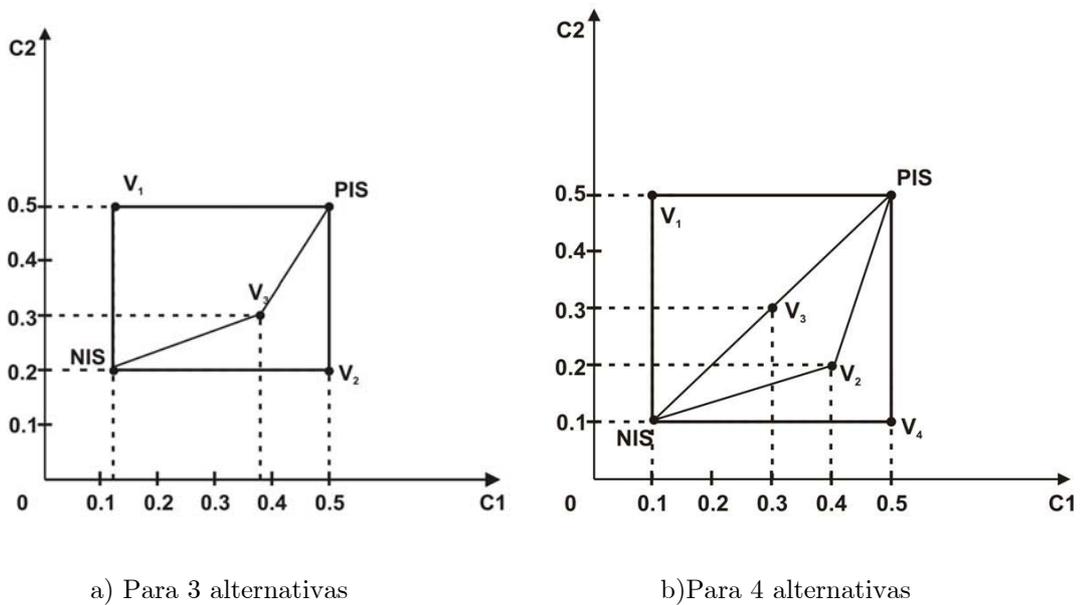
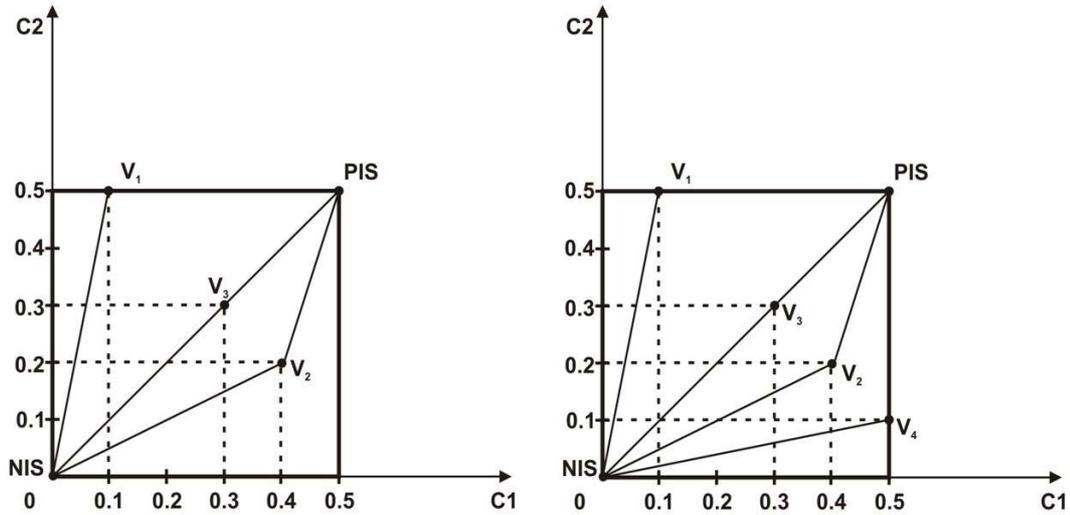


Figura II.24: Modo relativo

Modo absoluto



a) Para 3 alternativas

b) Para 4 alternativas

Figura II. 25: Modo absoluto

Pero es posible que queramos obtener la mejor alternativa en términos “absolutos”. En este caso el NIS se correspondería con la peor alternativa que pudiéramos obtener en el espacio de las alternativas. En nuestro ejemplo se correspondería con (0,0), de igual forma el PIS debería corresponderse con la mejor alternativa posible (5,5), y que reflejamos en la Figura II.25. Estas alternativas pueden ser reales o no.

Por tanto lo que conseguimos es que  $A^- = (0,0)$  y que  $A^+ = (0.5,0.5)$ , que se corresponde con los pesos de los criterios, al igual que el modelo relativo.

Tabla II.15: Algoritmo TOPSIS para el ejemplo a estudio con modificación de la norma e inclusión de alternativas ficticias

Pesos	0.5	0.5							
	$C_1$	$C_2$							
$A_1$	1	5	$n_1$	0.200	1.000	$v_1$	0.100	0.500	
$A_2$	4	2	$n_2$	0.800	0.400	$v_2$	0.400	0.200	
$A_3$	3	3	$n_3$	0.600	0.600	$v_3$	0.300	0.300	
$F_1$	5	5	$nF_1$	1.000	1.000	$vF_1$	0.500	0.500	
$F_2$	0	0	$nF_2$	0.000	0.000	$vF_2$	0.000	0.00	
$x_{ij}^{max}$	5	5					$A^+$	0.500	0.500
							$A^-$	0.000	0.000

Ranking

$d^+ A_1$	0.400	$d^- A_1$	0.509	$RA_1$	0.560	3
$d^+ A_2$	0.316	$d^- A_2$	0.447	$RA_2$	0.586	2
$d^+ A_3$	0.283	$d^- A_3$	0.424	$RA_3$	0.600	1

Para ello lo que debemos hacer es introducir dos alternativas ficticias  $F_1 = (Max S, Max S)$  y  $F_2 = (Min S, Min S)$  siendo  $S$  el espacio de las valoraciones. De esta forma y para nuestro caso particular  $F_1 = (5,5)$  y  $F_2 = (0,0)$ . Donde los resultados del algoritmo se pueden ver en la tabla II.15.

Si en vez de considerar criterios de beneficio, consideráramos criterios de costes, el razonamiento para  $A^+$  y  $A^-$  sería el opuesto.

Tabla II.16: Algoritmo TOPSIS para el ejemplo a estudio con modificación de la norma e inclusión de alternativas ficticias y la inclusión de una nueva alternativa

Pesos	0.5	0.5							
	$C_1$	$C_2$							
$A_1$	1	5	$n_1$	0.200	1.000	$v_1$	0.100	0.500	
$A_2$	4	2	$n_2$	0.800	0.400	$v_2$	0.400	0.200	
$A_3$	3	3	$n_3$	0.600	0.600	$v_3$	0.300	0.300	
$A_4$	5	1	$n_4$	1.000	0.200	$v_4$	0.500	0.100	
$F_1$	5	5	$nF_1$	1.000	1.000	$vF_1$	0.500	0.500	
$F_2$	0	0	$nF_2$	0.000	0.000	$vF_2$	0.000	0.00	
$x_{ij}^{max}$	5	5					$A^+$	0.500	0.500
							$A^-$	0.000	0.000

Ranking

$d^+ A_1$	0.400	$d^- A_1$	0.509	$RA_1$	0.560	3
$d^+ A_2$	0.316	$d^- A_2$	0.447	$RA_2$	0.586	2
$d^+ A_3$	0.283	$d^- A_3$	0.424	$RA_3$	0.600	1
$d^+ A_4$	0.400	$d^- A_4$	0.510	$RA_4$	0.560	3

Si introducimos la cuarta alternativa vemos como los valores que nos aparecen son los mismos que tenemos para las tres primeras, es decir  $R_1 = 0.560$ ,  $R_2 = 0.586$ ,  $R_3 = 0.600$  y  $R_4 = 0.560$ ,  $A_3 > A_2 > A_1 = A_4$ . Como vemos esto es debido a que los valores de referencia son  $A^+$  y  $A^-$  y no varían con el número de alternativas que podamos considerar.

Por tanto confirmamos que las tres alternativas tienen el mismo ranking, con lo que no existe inversión de orden.

### II.2.3.5. EL MÉTODO TOPSIS DIFUSO MODIFICADO

El método TOPSIS difuso se deriva del método TOPSIS genérico con menores diferencias, con las pertinentes adaptaciones de las operaciones asociadas a los números difusos.

De todas las modificaciones planteadas al método TOPSIS clásico surgen distintas versiones el método TOPSIS difuso cuya comparativa veremos en la siguiente tabla II.17 [166]:

Tabla II.17: Comparación de métodos TOPSIS difusos

Fuente	Pesos	Tipo de número difuso	Método de ordenación	Método de normalización y distancias
Chen y Hwang [83]	Números difusos	Trapezoidales	Aproximación de Lee and Li [209]	Normalización lineal
Liang [216]	Números difusos	Trapezoidales	Aproxiamción de Chen[82]	Distancia Manhattan
Chen [79]	Números difusos	Triangular	Chen [79] asume FPIS y PNIS como (1,1,1) y (0,0,0) respectivamente	Normalización lineal
Chu [89]	Números difusos	Triangular	Aproximación de Liou y Wang [220] con $\alpha=1/2$	Distancia Manhattan modificada
Tsaur et al [308]	Valores Crisp	Triangular	Aproximación de Zhao y Govind [367]	Normalización Vector
Chu and Lin[91]	Números difusos	Triangular	Aproximación de Kaufmann y Gupta[170]	Normalización lineal
Zhang and Lu [366]	Números difusos	Triangular	Chen [79] asume FPIS y PNIS como (1,1,1) y (0,0,0) respectivamente	Distancia Manhattan

En esta tesis doctoral se utiliza el método TOPSIS difuso, para seleccionar el orden de preferencias de las alternativas ya que es muy simple de implementar. En nuestro caso vamos a considerar la toma de decisión multicriterio que incluye tanto valores numéricos como etiquetas lingüísticas las cuales puede expresarse en una matriz del tipo ver Tabla II.18.

Vamos a ver las modificaciones del procedimiento TOPSIS difuso que planteamos en esta tesis doctoral:

### Paso 1: Establecimiento de la matriz difusa de valoración

Es muy importante la construcción de la matriz de decisión para optimizar la ordenación de las mejores alternativas. Como consecuencia la matriz de decisión puede ser de tres tipos: solo de valores numéricos (el caso del Método TOPSIS clásico), solo de valores lingüísticos o una mezcla de ambos. Los métodos de decisión multicriterio convencionales solo requieren valores precisos para un conjunto finito de alternativas. Sin embargo, el entorno de la toma de decisiones real está compuesto de ambos valores precisos e imprecisos y las matrices de decisión contienen tanto información objetiva como subjetiva. Por consiguiente, si todos o algunos de los pesos de los criterios son imprecisos, la utilización de la teoría de conjuntos difusos es una manera razonable de resolución. Algunos ejemplos pueden verse en Braglia et al [49], Chu, T.C. [89;90], Jahanshloo G et al [157], Wang T.C. y Chang T.H. [323].

La estructura de la matriz puede expresarse como sigue:

Tabla II.18: Matriz de decisión

	$w_1$	$w_2$	...	$w_j$	...	$w_n$
	$C_1$	$C_2$	...	$C_j$	...	$C_n$
$A_1$	$x_{11}$	$x_{12}$	...	$x_{1j}$	...	$x_{1n}$
$A_2$	$x_{21}$	$x_{22}$	...	$x_{2j}$	...	$x_{2n}$
...	...	...	...	...	...	...
$A_m$	$x_{m1}$	$x_{m2}$	...	$x_{mj}$	...	$x_{mn}$

Donde:

- $C_j$ ,  $j = 1, \dots, n$ , representan los atributos/criterios en función de lo cual valos a evaluar las alternativas.
- $A_i$ ,  $i = 1, \dots, m$ , denota las posibles alternativas;
- $\underline{W} = [\underline{w}_1, \underline{w}_2, \dots, \underline{w}_n]$  es el vector de pesos asociado con  $C_j$ ;
- $z_{ij} = \{x_{ij}, \underline{x}_{ij}\}$  representa las valoraciones de  $A_i$  con respecto a algún atributo/criterio; Siendo  $x_{ij} = [x_{ij}^a, x_{ij}^b, x_{ij}^c]$  la representación de un valor numérico difuso y  $\underline{x}_{ij} = [\underline{x}_{ij}^a, \underline{x}_{ij}^b, \underline{x}_{ij}^c]$  la representación de una etiqueta lingüística.

**Paso 2: Introducción de alternativas ficticias**

Al conjunto de las alternativas le añadimos la alternativa que se corresponda con el valor excelente (aquella que estaría valorada por la mejor de las etiquetas para todos los criterios)  $F_1 = (Max S_1, \dots, Max S_n)$  y la alternativa que se corresponda con el valor pésimo (aquella que estaría valorada por la peor de las etiquetas, para todos los criterios)  $F_1 = (Min S_1, \dots, Min S_n)$  siendo  $S$  el espacio de las valoraciones. Entenderemos estas variables como ficticias.

**Paso 3: Normalización de la matriz de decisión difusa**

Como hemos visto en el epígrafe precedente una de las modificaciones que planteamos al TOPSIS clásico es el cambio de normalización utilizando para ello el procedimiento 3 frente al procedimiento 1 utilizado por el algoritmo clásico del método TOPSIS

$$n_{ij}^3 = \frac{x_{ij}}{x_{ij}^{\max}}, \quad j = 1, \dots, n; \quad i = 1, \dots, m. \text{ en el caso de criterios de beneficio (II.78)}$$

$$n_{ij}^3 = \frac{x_{ij}^{\min}}{x_{ij}}, \quad j = 1, \dots, n; \quad i = 1, \dots, m. \text{ en el caso de criterios de coste (II.79)}$$

En el caso del método TOPSIS difuso  $n_{ij} = (n_{ij}^a, n_{ij}^b, n_{ij}^c)$  es un número difuso, y entonces necesitamos el uso de las operaciones definidas en (II.5), (II.6), (II.7), (II.8).

#### Paso 4: Construir la matriz de decisión normalizada ponderada

De manera similar al TOPSIS clásico procedemos para ponderar la matriz normalizada teniendo en cuenta las operaciones para números difusos

#### Paso 5: Cálculo de las medidas de distancia

Lejano o próximo significa medir distancias. La distancia es el grado o cantidad de separación entre dos puntos, líneas superficies o objetivos. Originalmente el método TOPSIS utiliza las distancias euclídeas para medir la distancias de las alternativas con su PIS y NIS, de manera que cada alternativa tenga la distancia más corta al PIS y la distancia más larga al NIS. En la versión difusa del método se realiza el cálculo de la distancia a la solución ideal positiva difusa FPIS y de la solución ideal negativa difusa FNIS.

Hay muchas distancias posibles en  $\mathfrak{R}^n$  pero las más usuales las recoge el enfoque unificador de Minkowski: La métrica de Minkowski  $m_p$  entre dos puntos  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  e  $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$  de  $\mathfrak{R}^n$  se define por:

$$m_p = \left[ \sum_j |x_j - y_j|^p \right]^{1/p}, \text{ para } p \geq 1 \quad (\text{II.80})$$

Los valores más utilizados para  $p$  son  $p = 1$ ,  $p = 2$  y  $p = \infty$ .

Cuando  $p = 1$ , (distancia Manhattan)  $m_1 = \sum |x_j - y_j|$

Cuando  $p = 2$  (distancia euclídea):  $m_2 = \left[ \sum |x_j - y_j|^2 \right]^{1/2}$

Para  $p \rightarrow \infty$ , y como el límite  $\left[ \sum |x_j - y_j|^p \right]^{1/p}$  tiende a  $\text{Max}_j |x_j - y_j|$  (distancia de Tchebycheff), se obtiene:  $m_\infty = \text{Max}_j |x_j - y_j|$

Podemos elegir cualquiera de estas distancias a fin de medir la proximidad al ideal o la lejanía del anti-ideal. En nuestro caso utilizaremos la distancia euclídea como medida de distancia.

#### Paso 6: Cálculo de la proximidad relativa a la solución ideal

De igual manera al TOPSIS clásico procedemos al cálculo de la proximidad relativa con la consideración de las operaciones correspondientes a la utilización de números difusos

#### Paso 7: Ordenación de preferencias

Se ordenan las mejores alternativas de acuerdo con  $\bar{R}_i$  en orden descendente, teniendo en cuenta que los valores de  $\bar{R}_i$  serán números difusos por los que hay que establecer un procedimiento de defuzzificación, en este caso como el plantado en el epígrafe II.2.3.6. y publicado en [133]

### II.2.3.6. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Existen muchos ejemplos de aplicaciones del Fuzzy TOPSIS en la literatura como apuntamos en la siguiente tabla II.19.

Tabla II.19: Aplicaciones del método TOPSIS difuso en la literatura

APLICACIONES	AUTORES
Calidad	Saremi, Mosavi y Sanayei [282] Benitez, Martin y Román [32]
Comparación entre compañías	Deng, Yeh y Willis [105]
Planificación de producción	Wang y Liang [322]
Programación no lineal multiobjetivo	Abo-Sina y Amer [3] Abo-Sina Amer y Abou-El-Enien [2]
Evaluación de firmas de transporte	Gumus [141]
Selección de suministradores	Önut, Kara y Isik [248] Chen, Lin y Huang [80]
Distribución en planta	Yang y Hung [345;346]
Introducción nuevo producto	Kahraman, Büyüközkan y Ates [166]
Selección de localización	Ertugrul & Karakasiglu [117] Chu [90] Kuo, Tzeng y Huang [193]
Selección de personal	Chen [79]
Selección de robots	Chu y Lin [91] Shih [288]
Evaluación de riesgo	Wang y Elhag [327]
Logística	Bottani y Rizzi [45] Büyüközkan, Feyzioglu and Nebol [58]
Selección de simulador de vuelo	Yeh and Chang [348]
Evaluación funcionamiento de empresas	Ertugrul y Karakasoglu [119]
Selección de profesorado	Ertugrul y Karakasoglu [118]
Selección de materiales	Milani, Shanian, Madoliat, Nemes [229]
Selección de prototipos	Byun y Lee [60]
Evaluación de sistemas de robótica industrial	Kahraman, Cevik, Ates y Gulbay [165]
Producción	Lin y Chang [219]
Mantenimiento	Braglia, Frosolini y Montanari [49] Cables-Pérez, Garcia-Cascales y Lamata [61]

### II.2.4. RESUMEN

En este capítulo se ha presentado una metodología híbrida para la evaluación de alternativas, por un lado el AHP para la obtención del peso de los criterios y por otro el método TOPSIS, donde hemos incluido modificaciones que lo mejoran frente a la versión clásica, para la evaluación de las alternativas. Esto

nos permite trabajar con una metodología híbrida donde utilizamos las fortalezas de cada uno de los métodos clásicos utilizados.

**BLOQUE III.**  
**SISTEMA DE AYUDA A LA DECISIÓN**  
**PARA EL RANKING DE**  
**UNIVERSIDADES EN EL ÁMBITO DE LA**  
**INGENIERÍA INDUSTRIAL**



## CAPÍTULO III.1

### Planteamiento del Problema

---

#### III.1.1. PROGRAMA DE EVALUACIÓN INSTITUCIONAL (PEI)

La Agencia Nacional de Evaluación de la Calidad y Acreditación (ANECA) [17] es una fundación estatal creada el 19 de julio de 2002, en cumplimiento de lo establecido en la LOU [222] ANECA tiene como misión: contribuir a la mejora de la calidad del sistema de educación superior, mediante evaluación, certificación y acreditación de enseñanzas, profesorado e instituciones.

Las funciones de la ANECA son:

- Potenciar la mejora de la actividad docente, investigadora y de gestión de las universidades.
- Contribuir a la medición del rendimiento de la Educación Superior conforme a procedimientos objetivos y procesos transparentes.
- Proporcionar a las Administraciones Públicas información adecuada para la toma de decisiones.
- Informar a la sociedad sobre el cumplimiento de objetivos en las actividades de las universidades.

El RD 1393/2007 [261] por el que se establece la ordenación de las enseñanzas universitarias oficiales establece en su capítulo VI dentro del artículo correspondiente a la Verificación y Acreditación que:

- Los títulos universitarios oficiales deberán someterse a un procedimiento de evaluación cada 6 años a contar desde la fecha de su registro en el Registro de Universidades, Centros y Títulos (RUCT), con el fin de mantener su acreditación.
- A estos efectos la Agencia Nacional de Evaluación de la Calidad y Acreditación (ANECA), establecerá los protocolos de verificación y acreditación necesarios.

Por otro lado los rankings universitarios que hace solo 20 años eran una novedad, hoy son una práctica normal en la mayoría de los países con grandes

sistemas de educación superior [121;236;294;333]. Estas listas tienen un elevado y creciente impacto no solo entre las propias universidades, sino también entre diferentes sectores sociales. Por lo que supone un buen ejemplo de comparación de alternativas a estudiar por la presente tesis doctoral.

Los rankings universitarios son listas de ciertas agrupaciones de instituciones (por lo general dentro de una sola jurisdicción nacional), clasificadas en forma comparativa de acuerdo con un conjunto común de indicadores en orden descendente. Se presentan habitualmente en forma de “tabla de posiciones”, de mejor a peor.

Asimismo la reorganización a escala europea de los estudios universitarios como resultado del Proceso de Bolonia contribuirá de manera activa a la armonización europea de los aspectos académicos básicos, que permitirán, por una parte una mejor articulación entre las universidades y por otra una más fácil comparación entre ellas; para ello serán necesarios determinados indicadores de funcionamiento. Todo esto nos hace pensar en la necesidad de la existencia de rankings globales de universidades como instrumento para medir rigurosamente la calidad de las universidades [57;121;279].

Desde el curso 2004/2005 la Agencia Nacional de Evaluación de la Calidad y Acreditación (ANECA) [16;17] dentro de sus actividades ha establecido un procedimiento para la evaluación de enseñanzas e instituciones, mediante el Programa de Evaluación Institucional (PEI), el cual consta de tres fases: Autoevaluación, Evaluación Externa, y Plan de Mejoras.

El principal objetivo del Programa de Evaluación Institucional (PEI) [16] es facilitar un proceso de evaluación para la mejora de la calidad de las enseñanzas conducentes a la obtención de títulos universitarios de carácter oficial y validez en todo el territorio nacional, a través de su autodiagnóstico y de la visión externa que aportan expertos. Así mismo, mediante el desarrollo de este programa, se pretende promover procesos de evaluación que favorezcan el establecimiento o la continuidad de procesos de garantía de calidad en las enseñanzas, así como proporcionar información a los estudiantes y sus familias, al conjunto de la sociedad, a los gobiernos de las universidades y a las administraciones públicas sobre la calidad de las enseñanzas universitarias y sus planes de actuación.

La evaluación institucional consta de tres fases, ver Figura III.1:

- **Autoevaluación:** la unidad evaluada, a través del Comité de Autoevaluación, describe y valora su situación respecto a los criterios establecidos, identificando inicialmente aquellas propuestas de mejora a partir de las cuales se elaborarán los planes de actuación que deberán ponerse en marcha una vez concluido todo el proceso. El resultado es el “Informe de Autoevaluación”.
- **Evaluación externa:** un grupo de evaluadores externos a la unidad evaluada, nombrados por la ANECA, y bajo las directrices y supervisión de la misma, analiza el Informe de Autoevaluación, tanto a través de un

estudio documental, como por medio de una visita a la unidad evaluada, emite sus recomendaciones y propone mejoras. El resultado de esta fase es el “Informe de Evaluación Externa”. Fase en la que se va a centrar la aplicación de la presente tesis doctoral.

- **Plan de Mejoras:** se recogen los principales resultados del proceso de evaluación. En esta fase se lleva a cabo el plan de mejoras de la unidad, en el que se relacionan las acciones de mejora detectadas en la fase de autoevaluación, y se determinan las tareas a realizar para la consecución de las mismas, así como los responsables, los recursos implicados y los plazos para su implantación. Del mismo modo, se identifican los indicadores de seguimiento de las acciones detectadas así como los beneficios esperados de las mismas.

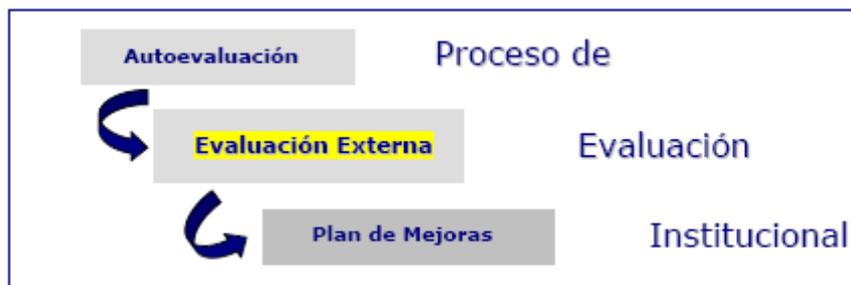


Figura III.1: Fases del PEI

El PEI que propone la ANECA está basado en 6 criterios principales [16] referidos a los aspectos más relevantes a valorar durante el proceso de evaluación de la enseñanza: 1. Programa Formativo, 2. Organización de la Enseñanza, 3. Recursos Humanos, 4. Recursos Materiales, 5. Proceso Formativo y 6. Resultados. Dichos criterios abarcan los principios de calidad total reconocidos internacionalmente.

El análisis de estos criterios ayuda a realizar un diagnóstico de situación de la enseñanza evaluada. Cada criterio se desagrega en uno o más subcriterios de diferentes niveles. De igual modo, se presentan los indicadores que servirán para medir el cumplimiento de cada uno de ellos. (Figura III.2).

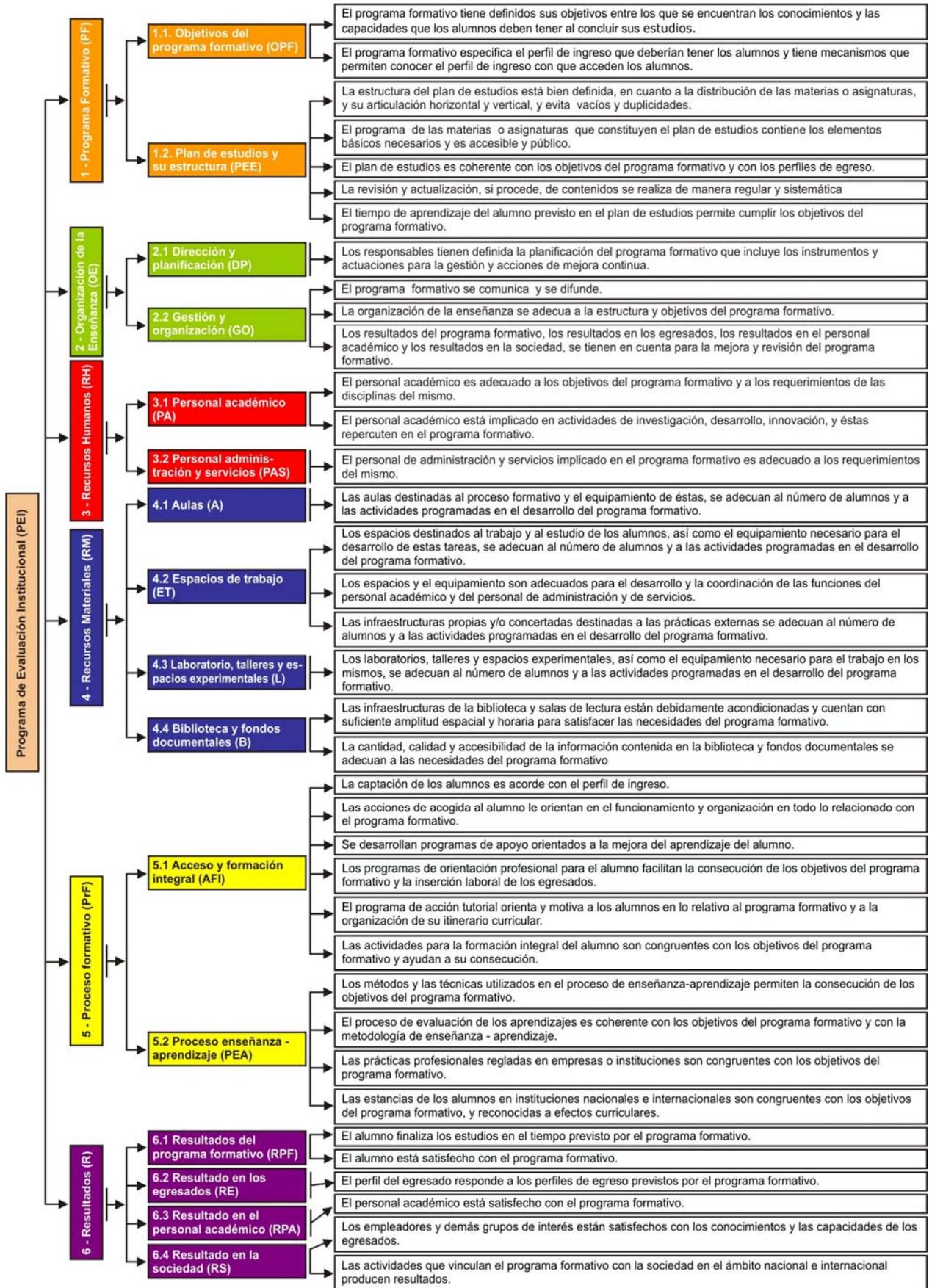


Figura III.2: Criterios, subcriterios e indicadores del PEI

### III.1.2. OBJETIVOS DEL S.A.D.

En este contexto proponemos un Sistema de Ayuda a la Decisión (S.A.D.) para la evaluación de las titulaciones en el ámbito de la Ingeniería Industrial dentro del sistema universitario español, basado en el Libro Blanco de Titulaciones de Grado de Ingeniería de la Rama Industrial (Propuesta de las Escuelas Técnicas Superiores de Ingenieros Industriales) [15]; el cual incluye la siguiente relación de universidades participantes (Tabla III.1) y de titulaciones (Tabla III.2).

Tabla III.1: Relación de Universidades participantes en el Libro Blanco de las Titulaciones de Ingeniería Rama Industrial

RELACION DE UNIVERSIDADES	
Universidad Alfonso X el Sabio	Universidad Miguel Hernández
Universidad Antonio Nebrija	Universidad de Mondragón
Universidad de Cádiz	Universidad de Murcia
Universidad de Cantabria	Universidad Nacional de Educación a Distancia
Universidad Carlos III de Madrid	Universidad de Navarra
Universidad de Castilla la Mancha	Universidad de Oviedo
Universidade de la Coruña	Universidad del País Vasco
Universidad Europea de Madrid	Universidad Politécnica de Cartagena
Universidad de Extremadura	Universitat Politècnica de Catalunya
Universitat de Girona	Universidad Politécnica de Madrid
Universidad de Huelva	Universitat Politècnica de València
Universidad de Jaén	Universidad Pontificia Comillas de Madrid
Universitat Jaime I	Universidad Pública de Navarra
Universidad de la Rioja	Universidad de Salamanca
Universidad de las Palmas de Gran Canaria	Universidad de Sevilla
Universidad de León	Universidad de Valladolid
Universidad de La Laguna	Universidad de Vigo
Universidad de Málaga	Universidad de Zaragoza

Este S.A.D está basado en el Programa de Evaluación Institucional (P.E.I.) y en concreto en la fase de Evaluación Externa [16] y en concreto nos vamos a basar en el Informe de Evaluación Externa IEE de la ANECA, informe que ha sido elaborado por un Comité de Evaluación Externa (CEE)

Tabla III.2 Relación de titulaciones participantes en el Libro Blanco de las  
Titulaciones de Ingeniería Rama Industrial

RELACIÓN DE TITULACIONES
Ingeniero industrial
Ingeniero químico
Ingeniero en automática y electrónica industrial
Ingeniero de materiales
Ingeniero en electrónica
Ingeniero en organización industrial
Ingeniero en sistemas de defensa
Ingeniero técnico industrial especialidad en electrónica industrial
Ingeniero técnico industrial especialidad en electricidad
Ingeniero técnico industrial especialidad en mecánica
Ingeniero técnico industrial especialidad en química industrial
Ingeniero técnico industrial especialidad en textil
Ingeniero técnico en diseño industrial

Los miembros del Comité de Evaluación Externa son personas a las que ANECA, en función de su experiencia y formación, califica como evaluador externo, una vez que complementan su formación con los aspectos específicos necesarios para el correcto desarrollo de su trabajo y se realiza su nombramiento.

El Comité de Evaluación Externa actúa en nombre de ANECA, y sus actuaciones se regirán por las indicaciones establecidas en el PEI. Los evaluadores deberán tener en cuenta la confidencialidad de la información con la que trabajan, no pudiendo hacer pública ninguna información o dato relacionado con las enseñanzas visitadas.

La estructura del S.A.D. propuesta es la que se presenta en la Figura III.3. Este sistema está compuesto, básicamente, por una estructura de base de datos la cual se ha desarrollado en Microsoft Access y que consta de tres partes como se puede apreciar en la Figura III.3.

Y además de la estructura de la Base de Datos el sistema consta de la Base de Modelos donde se aplicarán los distintos Métodos de Decisión Multicriterio (en concreto el algoritmo correspondiente al TOPSIS clásico y el algoritmo correspondiente al TOPSIS modificado el cual ha sido desarrollado en el Bloque II.) para evaluar las distintas alternativas en nuestro caso serán titulaciones y universidades, y finalmente la salida de resultados la defuzzificación de los mismos y el ranking de las alternativas.

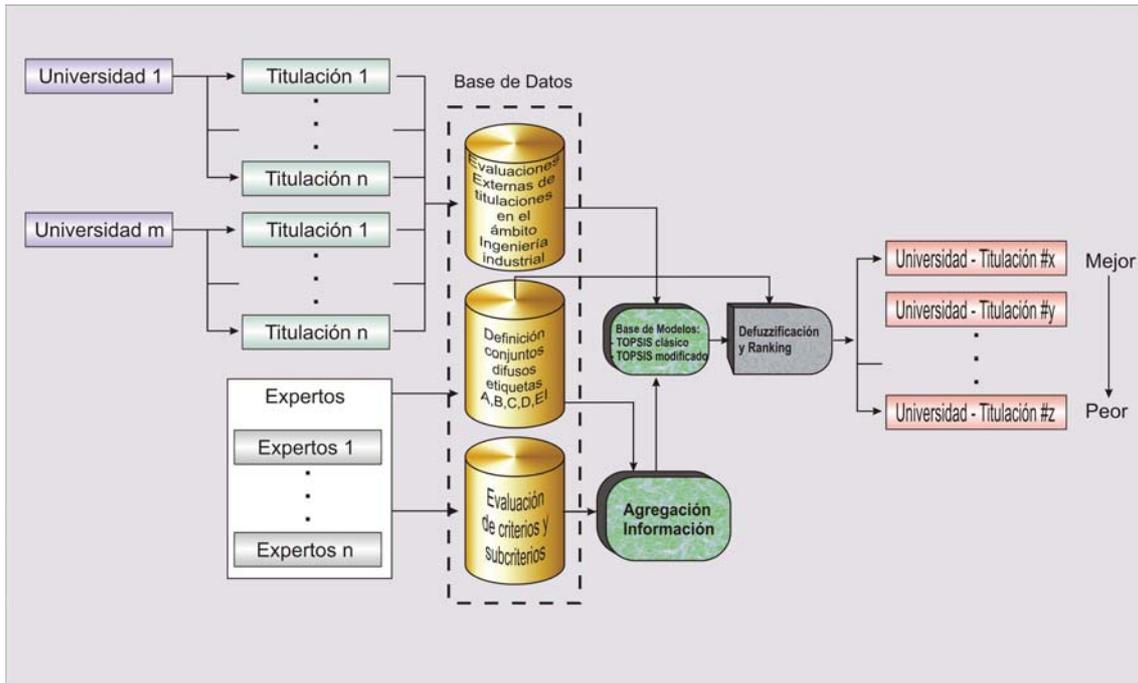


Figura III.3: Estructura del S.A.D.



## CAPÍTULO III.2

### Base de Datos

---

#### III.2.1. INTRODUCCIÓN

La base de datos del S.A.D. se estructura en tres partes Figura III.4:

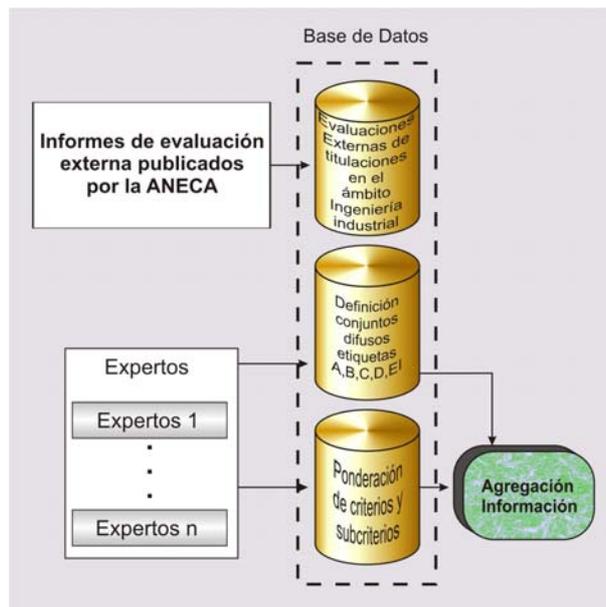


Figura III.4: Estructura de la base de datos

- La base de datos correspondiente a los informes IEE, publicadas por la ANECA para cada una de las universidades y titulaciones a estudio; en este caso las basadas en el Libro Blanco de Titulaciones de Grado de Ingeniería de la Rama Industrial [15].
- La base de datos de la que se extraen los conjuntos difusos para la definición de las etiquetas semicuantitativas, utilizadas en el cuestionario de la Evaluación de la Enseñanza, dentro del protocolo para elaborar el Informe de Evaluación Externa desarrollado por la ANECA [16]. Esta base de datos se ha elaborado a partir de la extracción del conocimiento mediante un cuestionario enviado a los expertos de la propia ANECA [131].

- Finalmente la base de datos correspondiente a la ponderación de los criterios y subcriterios de evaluación, definidos por la ANECA en el cuestionario de la Evaluación de las Enseñanzas del Informe de Evaluación Externa [16] igualmente elaborado a partir de la extracción del conocimiento mediante el cuestionario enviado a los expertos de la propia ANECA [131]

La base de datos se ha implementado en Microsoft Access y cuya raíz tiene las siguientes entradas Figura III.5:



Figura III.5: Formulario raíz de entrada de datos a la Base de Datos

- Respuestas Encuestas IEE: Que se corresponde a la base de datos correspondiente a los distintos informes IEE de la ANECA.
- Respuestas de Expertos: Que se corresponde con la base de datos correspondiente a la definición de las etiquetas semicuantitativas y la base de datos correspondiente a la ponderación de los criterios/subcriterios.

### III.2.2. BASE DE DATOS IEE

La base de datos correspondiente a las encuestas de Evaluación Externa de la ANECA, IEE, se ha realizado en base exclusivamente con los datos publicados por la propia ANECA [17] o aquellos que las universidades han publicado en sus páginas web. En la tabla III.3 se puede comprobar los informes que han sido publicados hasta la fecha y de la que disponemos de la información para nuestra base de datos.

Tabla III.3. Informes publicados por la ANECA[17]

Universidad	Centro	Titulación	Anualidad	Presidente	Informes
Mondragón Unibersitatea	Escuela Politécnica Superior	Ingeniero de Organización Industrial	2003/2004	Francisco Javier Mendiluce	IA IEE PM
Mondragón Unibersitatea	Escuela Politécnica Superior	Ingeniero Industrial	2005/2006	Francisco Javier Mendiluce	IA IEE PM
U. Alfoso X El Sabio	Escuela Politécnica Superior	Ingeniero Industrial	2004/2005	Esther Rincón Rincón	IA IEE PM
U. Antonio de Nebrija	Escuela Politécnica Superior	Ingeniero Industrial	2005/2006	Alberto López Rosado	IA IEE PM
Universidad Cardenal Herrera-CEU	Escuela Universitaria de Enseñanzas Técnicas	Ingeniero Técnico en Diseño industrial	2005/2006	José Luís Ferrer Muñoz	IA IEE PM
U. de Alicante	Facultad de Ciencias	Ingeniero Químico	2004/2005	Juan A. Reyes Labarta	IA IEE PM

U. de Burgos	Escuela Politécnica Superior	Ingeniero de Organización Industrial	2004/2005	José M <sup>a</sup> Cámara	IA IEE PM
U. de Cádiz	Facultad de Ciencias	Ingeniero Químico	2004/2005	Francisco A. Macías Domínguez	IA IEE PM
U. de Castilla-La Mancha	Facultad de Química (Ciudad Real)	Ingeniero Químico	2003/2004	José Luis Valverde Palomino	IA IEE PM
U. de Castilla-La Mancha	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (Ciudad Real)	Ingeniero Industrial	2004/2005	Vicente Feliú Batlle	IA IEE PM
U. de Castilla-La Mancha	Escuela Politécnica Superior (Albacete)	Ingeniero Técnico Industrial, Especialidad Electrónica Industrial	2005/2006	Antonio Garrido del Solo	IA IEE PM
U. de Jaén	Escuela Politécnica Superior	Ingeniero de Organización Industrial	2003/2004	Pedro Gómez Vidal	IA IEE PM
U. de La Laguna	Facultad de Química	Ingeniero Químico	2005/2006	Andrea Brito Alayón	IA IEE PM
U. de Murcia	Facultad de Química	Ingeniero Químico	2003/2004	Gregorio Sánchez Gómez	IA IEE PM
U. de Navarra	Escuela Superior de Ingenieros	Ingeniero Industrial	2005/2006	Carlos Bastero de Eleizalde	IA IEE PM
U. de Salamanca	Escuela Politécnica Superior de Zamora	Ingeniero Técnico Industrial, Especialidad en Mecánica	2005/2006	José Luís Pérez Iglesias	IA IEE PM
U. de Sevilla	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales	Ingeniero de Organización Industrial	2005/2006	Federico Paris Carballo	IA IEE PM
U. de Sevilla	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales	Ingeniero en Automática y Electrónica Industrial	2005/2006	Federico Paris Carballo	IA IEE PM
U. de Sevilla	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales	Ingeniero en Electrónica	2005/2006	Federico Paris Carballo	IA IEE PM
U. de Zaragoza	Centro Politécnico Superior	Ingeniero Industrial	2004/2005	Rafael Navarro Linares	IA IEE PM
U. de Zaragoza	Centro Politécnico Superior	Ingeniero Químico	2004/2005	Rafael Navarro Linares	IA IEE PM
U. de Zaragoza	Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial	Ingeniero Técnico Industrial, Especialidad Electricidad	2005/2006	Francisco Arcega Solsona	IA IEE PM
U. de Zaragoza	Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial	Ingeniero Técnico Industrial, Especialidad en Mecánica	2005/2006	Francisco Arcega Solsona	IA IEE PM
U. de Zaragoza	Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial	Ingeniero Técnico Industrial, Especialidad en Química Industrial	2005/2006	Francisco Arcega Solsona	IA IEE PM
U. del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea	Facultad de Ciencias	Ingeniero en Electrónica	2005/2006	José Manuel Tarela Pereiro	IA IEE PM
U. Europea de Madrid	Escuela Superior de Ingeniería Industrial	Ingeniero Industria	2003/2004	Rafael García de la Sen	IA IEE PM
U. Politécnica de Cartagena	Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial	Ingeniero de Organización Industrial	2004/2005	Antonio Gabaldón Marín	IA IEE PM
U. Politécnica de Cartagena	Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial	Ingeniero Industrial	2004/2005	Antonio Gabaldón Marín	IA IEE PM
U. Politécnica de Madrid	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales	Ingeniero Industrial	2005/2006	Jesús Féliz Mindán	IA IEE PM
U. Politécnica de Madrid	Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica	Ingeniero Técnico Industrial,	2005/2006	José Antonio Lozano Ruiz	IA IEE

	Industrial	Especialidad Electricidad			PM
U. Politécnica de Madrid	Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial	Ingeniero Técnico Industrial, Especialidad Electrónica Industrial	2005/2006	José Antonio Lozano Ruiz	IA IEE PM
U. Politécnica de Madrid	Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial	Ingeniero Técnico Industrial, Especialidad Mecánica	2005/2006	José Antonio Lozano Ruiz	IA IEE PM
U. Politécnica de Madrid	Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial	Ingeniero Técnico Industrial, Especialidad Química Industrial	2005/2006	José Antonio Lozano Ruiz	IA IEE PM
U. Rey Juan Carlos	Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología	Ingeniero Químico	2004/2005	David Pedro Serrano Granados	IA IEE PM
Universitat de València	Facultad de Ciencias Químicas	Ingeniero Químico	2005/2006	María Isabel Vázquez Navarro	IA IEE PM
Universitat Jaume I	Escuela Superior de Tecnología y Ciencias Experimentales	Ingeniero Técnico Industrial, Especialidad en Mecánica	2005/2006	Joaquín L. Sancho Bru	IA IEE PM
Universitat Politècnica de València	Escuela Politécnica Superior de Alcoy	Ingeniero de Organización Industrial	2004/2005	Alejandro Rodríguez Villalobos	IA IEE PM
Universitat Politècnica de València	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales	Ingeniero de Organización Industrial	2004/2005	Juan Jaime Cano Hurtado	IA IEE PM
Universitat Politècnica de València	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales	Ingeniero Químico	2004/2005	Juan Jaime Cano Hurtado	IA IEE PM

Los informes publicados hasta la fecha son los correspondientes a las titulaciones sombreadas

IA: Informe de Autoevaluación, IEE: Informe de Evaluación Externa y PM: Plan de Mejora

De este modo se han ido introduciendo de manera manual en un formulario al efecto, en el que por universidad y titulación se van introduciendo todos los valores de los IEE de la ANECA. Ver figura III.6.

Figura III.6: Formulario correspondiente a la base de datos de los Informes de Evaluación Externa IEE de la ANECA

El formulario está compuesto por un desplegable correspondiente a las universidades y titulaciones participantes (ver tablas III.1 y III.2).

Asimismo el formulario tiene las siguientes opciones:

- Dar de alta esta titulación para esta universidad: A la hora de introducir un nuevo informe de una universidad. Ver ejemplo en la Figura III.7

The screenshot shows a window titled 'valores : Formulario' with seven rows of criteria. Each row contains a text description on the left and a dropdown menu labeled 'valor' on the right. The selected values are: D, B, C, A, C, C, and D.

Criterio	valor
El programa formativo tiene definidos sus objetivos entre los que se encuentran los conocimientos y las capacidades que los alumnos deben tener al concluir sus estudios	D
El programa formativo especifica el perfil de ingreso que deberían tener los alumnos y tiene mecanismos que permient conocer el perfil de ingreso con que acceden los alumnos	B
La estructura del plan de estudios está bien definida, en cuento a la distribución de las materias o asignaturas, y su articulación horizontal y vertical, y evita vacíos y duplicaciones	C
El programa de las materias o asignaturas que constituyen el plan de estudios contiene los elementos básicos necesarios y es accesible y público	A
El plan de estudios es coherente con los objetivos del programa formativo y con los perfiles de egreso	C
La revisión y actualización, si procede de contenidos, se realiza de manera regular y sistemática	C
El tiempo de aprendizaje del alumno, previsto en el plan de estudios, permite cumplir los objetivos del programa formativo.	D

Figura III.7: Ejemplo de introducción manual de los formularios de IEE

- Eliminar título de universidad: Por si se quiere eliminar alguno de los informes existentes.

The screenshot shows a web application window titled 'Gestión respuestas Expertos - [UniversidadesYTitulos]'. The main content is a table with two columns: 'Universidades' and 'Titulaciones'. The table lists various universities and the degrees they offer.

Universidades	Titulaciones
Castilla La Mancha	Ingeniero Industrial
	Ingeniero Técnico Industrial en electrónica indust
de la Laguna	Ingeniero Químico
de Murcia	Ingeniero Químico
de Navarra	Ingeniero Industrial
de Salamanca	Ingeniero Técnico Industrial en mecánica
de Sevilla	Ingeniero en Automática y electrónica industrial
	Ingeniero en Electrónica
	Ingeniero en Organización Industrial
de Zaragoza	Ingeniero Industrial
	Ingeniero Técnico en diseño industrial

Figura III.8: Ejemplo de relación de universidades-titulaciones introducidas en la base de datos

- Cambiar los valores de las respuestas: Para editar los valores de los informes existentes.
- Ver listado de Títulos y Universidades: Para saber cuales son los informes IEE, introducidos. Se puede ver un ejemplo en Figura III.8

En la introducción manual de las encuestas IEE, se han implementado la encuestas para los 37 indicadores del IEE y unos desplegables con las etiquetas semicuantitativas (A,B,C,D,EI) utilizadas en el protocolo de elaboración de dichos informes.

### III.2.3. ENCUESTA ENVIADA A EXPERTOS

Las dos partes de la Base de Datos se han realizado a partir de un de un cuestionario diseñado al efecto y la propia ANECA se brindó a difundir la encuesta entre sus evaluadores que son los expertos. El cuestionario ha sido elaborado en Microsoft Excel y fue enviado/respondido vía correo electrónico.

El cuestionario diseñado tiene dos partes claramente diferenciadas, la primera se ha realizado en base a la estructura jerárquica de los criterios y subcriterios (Figura III.1), utilizando para ello la metodología AHP [275;276] desarrollada por Saaty y ampliamente aceptada por la comunidad científica y que ha sido estudiada en el Bloque II de la presente tesis doctoral.

Y la segunda parte del cuestionario se basa en la encuesta semicuantitativa de la Evaluación de las Enseñanzas dentro del protocolo para elaborar el IEE por la ANECA

La presentación de la encuesta es la que se puede apreciar en la Figura III.9 donde el experto va pasando por las sucesivas preguntas activando las botoneras de comenzar y seguir, según se va desarrollando el cuestionario.

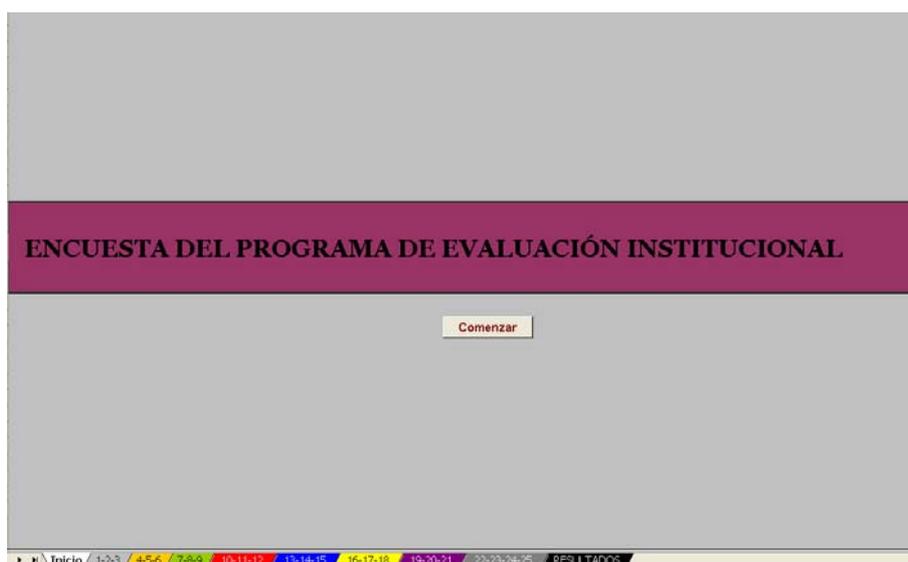


Figura III.9: Carátula de la encuesta enviada a expertos

La encuesta consta dos partes o fases con 25 preguntas, la primera fase tiene 7 bloques de tres preguntas cada una y la segunda parte consta de un único bloque de cuatro preguntas. Al final hay un panel de resultados de las respuestas, fichero que nos servirá para extraer los datos del experto y así poder manipular la información más fácilmente.

### III.2.2.1. PRIMERA FASE DE LA ENCUESTA

Para el diseño de la encuesta nos basamos en la metodología AHP donde se establecen matrices de comparación por pares entre criterios. Dado que el número de preguntas/juicios para la generación de las matrices por pares va en función del tamaño de cada una de las matrices según:

$$L = n(n - 1)/2 \quad (\text{III.1})$$

Siendo  $n$  el tamaño de la matriz por pares y  $L$  el número de juicios.

Esta primera fase consiste en preguntar sobre la importancia de los criterios y subcriterios que hay establecidos en el Programa de Evaluación Institucional, según la estructura jerárquica de la Figura III.1. Dado que son 6 criterios principales, 16 subcriterios secundarios y 37 indicadores, esto da la siguiente Tabla III.4 de número de comparaciones por nivel.

Tabla III.4. Tabla comparaciones necesarias por niveles

NIVEL	CRITERIOS	MATRICES	n	COMPARACIONES
1 <sup>ER</sup>	6	1	6	15
2 <sup>o</sup>	16	6	2	1
			2	1
			2	1
			4	6
			2	1
			4	6
3 <sup>ER</sup>	37	15	2	1
			5	10
			1	0
			3	3
			2	1
			2	1
			3	3
			1	0
			2	1
			6	15
			4	6
			2	1
			1	0
1	0			
1	0			
TOTAL				74 Comparaciones

A la hora de diseñar la encuesta y para conseguir el mayor número de respuestas a la misma no haciéndola excesivamente larga; se decidió preguntar únicamente por los 6 criterios principales y los 16 subcriterios secundarios, estableciendo una distribución de peso uniforme para los indicadores de tercer nivel, es decir para las 37 restantes.

Por ejemplo para el caso de los criterios principales donde tendríamos una matriz de tamaño 6 necesitaríamos 15 preguntas, esto llevado también al segundo nivel con 16 subcriterios divididos en 4 matrices de tamaño 2 y dos matrices de tamaño 4 nos daría un total de 31 preguntas (ver tabla III.4), lo cual supone todavía una encuesta excesivamente larga.

De las  $L = n(n-1)/2$  preguntas del modelo para una matriz  $n$ , se puede ver que existen preguntas que se podría considerar redundantes, con lo que el número de preguntas por matriz podría ser de  $(n-1)$  preguntando previamente el orden de importancia de cada uno de los criterios o subcriterios.

De esta manera se planteó una encuesta en la que preguntar únicamente por una fila de la matriz de comparación pareada (entre criterios y subcriterios) y a partir de aquí generar el resto de la información de la matriz haciendo que esta fuera completamente consistente. En el que se pregunta si todos los criterios/subcriterios tienen el mismo peso dentro de su nivel, seguidamente el orden de importancia de los criterios/subcriterios en su nivel y finalmente las  $(n-1)$  comparaciones por pares para cada matriz  $n$ , es decir 3 preguntas para cada matriz. Quedando finalmente solamente 21 preguntas para esta parte del cuestionario Ver Tabla III.5.

Tabla III.5. Tabla de preguntas del cuestionario

NIVEL	CRITERIOS	MATRICES	n	COMPARACIONES	PREGUNTAS
1 <sup>ER</sup>	6	1	6	5	3
2 <sup>o</sup>	16	6	2	1	3
			2	1	3
			2	1	3
			4	3	3
			2	1	3
			4	3	3
				Preguntas Totales	21

### **Criterios principales o criterios de primer nivel**

El PEI establece 6 criterios principales o de primer nivel los cuales son: 1 Programa formativo PF, 2. Organización de las enseñanzas OE, 3. Recursos Humanos RH, 4. Recursos materiales RM, 5. Proceso formativo PrF y finalmente 6. Resultados R.

1. ¿Cree que todos los criterios principales (1. PROGRAMA FORMATIVO, 2. ORGANIZACIÓN DE LA ENSEÑANZA, 3. RECURSOS HUMANOS, 4. RECURSOS MATERIALES, 5. PROCESO FORMATIVO, 6. RESULTADOS) a la hora de evaluar una titulación tiene el mismo peso?

SI  NO

2. Escriba el orden de importancia que usted cree que debe tener cada uno de los criterios principales

1- Programa Formativo	<input type="radio"/> 1º lugar	<input type="radio"/> 2º lugar	<input type="radio"/> 3º lugar	<input type="radio"/> 4º lugar	<input type="radio"/> 5º lugar	<input type="radio"/> 6º lugar
2- Organización de la enseñanza	<input type="radio"/> 1º lugar	<input type="radio"/> 2º lugar	<input type="radio"/> 3º lugar	<input type="radio"/> 4º lugar	<input type="radio"/> 5º lugar	<input type="radio"/> 6º lugar
3- Recursos Humanos	<input type="radio"/> 1º lugar	<input type="radio"/> 2º lugar	<input type="radio"/> 3º lugar	<input type="radio"/> 4º lugar	<input type="radio"/> 5º lugar	<input type="radio"/> 6º lugar
4- Recursos Materiales	<input type="radio"/> 1º lugar	<input type="radio"/> 2º lugar	<input type="radio"/> 3º lugar	<input type="radio"/> 4º lugar	<input type="radio"/> 5º lugar	<input type="radio"/> 6º lugar
5- Proceso Formativo	<input type="radio"/> 1º lugar	<input type="radio"/> 2º lugar	<input type="radio"/> 3º lugar	<input type="radio"/> 4º lugar	<input type="radio"/> 5º lugar	<input type="radio"/> 6º lugar
6- Resultados	<input type="radio"/> 1º lugar	<input type="radio"/> 2º lugar	<input type="radio"/> 3º lugar	<input type="radio"/> 4º lugar	<input type="radio"/> 5º lugar	<input type="radio"/> 6º lugar

3. Compare el criterio que usted ha considerado en primer lugar con respecto al resto utilizando las siguientes etiquetas:

<input type="radio"/> II	<input type="radio"/> M+I	<input type="radio"/> +I	<input type="radio"/> Mu+I	<input type="radio"/> Ex+I
<input type="radio"/> II	<input type="radio"/> M+I	<input type="radio"/> +I	<input type="radio"/> Mu+I	<input type="radio"/> Ex+I
<input type="radio"/> II	<input type="radio"/> M+I	<input type="radio"/> +I	<input type="radio"/> Mu+I	<input type="radio"/> Ex+I
<input type="radio"/> II	<input type="radio"/> M+I	<input type="radio"/> +I	<input type="radio"/> Mu+I	<input type="radio"/> Ex+I
<input type="radio"/> II	<input type="radio"/> M+I	<input type="radio"/> +I	<input type="radio"/> Mu+I	<input type="radio"/> Ex+I

II: Igualmente importante  
M+I: Moderadamente más importante  
+I: Más importante  
Mu+I: Mucho más importante  
Ex+I: Extremadamente más importante

Seguir

Inicio \ 1-2-3 / 4-5-6 / 7-8-9 / 10-11-12 / 13-14-15 / 16-17-18 / 19-20-21 / 22-23-24-25 / RESULTADOS

Figura III.10: Preguntas sobre los criterios principales

Las tres primeras preguntas del cuestionario (1,2,3) Figura III.10 se refieren a los 6 criterios principales del PEI.:

1. ¿Cree que todos los criterios principales tiene el mismo peso a la hora de evaluar una titulación?
2. Escriba el orden de importancia que debe tener cada uno de los criterios principales
3. Compare el criterio que usted ha considerado en primer lugar con respecto al resto utilizando las siguientes etiquetas (II: Igualmente importante, M+I: Más importante; +I: Más importante: Mu+I: Mucho más importante; Ex+I: Extremadamente más importante)

Primero se pregunta (1) si todos los criterios tienen el mismo peso, en caso afirmativo, ya tendríamos la información correspondiente a toda la matriz de comparación pareada y pasaríamos al siguiente bloque de preguntas (3,4,5). Si por el contrario el experto considera que no todos los criterios principales tienen el mismo peso, pasaría a la siguiente pregunta del cuestionario (2) en la que se consulta por el orden de importancia de los criterios (Se puede ver un ejemplo en la Figura III.11).

Una vez establecido este orden de importancia por parte del experto, la propia encuesta generará la siguiente pregunta (3) en la que el criterio seleccionado en primer lugar será comparado con el resto de criterios principales, utilizando para ello las etiquetas lingüísticas definidas por Saaty [275]. (Igualmente puede ver se en el ejemplo en la Figura III.11).

1. ¿Cree que todos los criterios principales (1. PROGRAMA FORMATIVO, 2. ORGANIZACIÓN DE LA ENSEÑANZA, 3. RECURSOS HUMANOS, 4. RECURSOS MATERIALES, 5. PROCESO FORMATIVO, 6. RESULTADOS) a la hora de evaluar una titulación tiene el mismo peso?

SI  NO

2. Escriba el orden de importancia que usted cree que debe tener cada uno de los criterios principales

1- Programa Formativo	<input type="radio"/> 1º lugar	<input checked="" type="radio"/> 2º lugar	<input type="radio"/> 3º lugar	<input type="radio"/> 4º lugar	<input type="radio"/> 5º lugar	<input type="radio"/> 6º lugar
2- Organización de la enseñanza	<input type="radio"/> 1º lugar	<input type="radio"/> 2º lugar	<input checked="" type="radio"/> 3º lugar	<input type="radio"/> 4º lugar	<input type="radio"/> 5º lugar	<input type="radio"/> 6º lugar
3- Recursos Humanos	<input checked="" type="radio"/> 1º lugar	<input type="radio"/> 2º lugar	<input type="radio"/> 3º lugar	<input type="radio"/> 4º lugar	<input type="radio"/> 5º lugar	<input type="radio"/> 6º lugar
4- Recursos Materiales	<input type="radio"/> 1º lugar	<input type="radio"/> 2º lugar	<input type="radio"/> 3º lugar	<input type="radio"/> 4º lugar	<input type="radio"/> 5º lugar	<input checked="" type="radio"/> 6º lugar
5- Proceso Formativo	<input type="radio"/> 1º lugar	<input type="radio"/> 2º lugar	<input type="radio"/> 3º lugar	<input checked="" type="radio"/> 4º lugar	<input type="radio"/> 5º lugar	<input type="radio"/> 6º lugar
6- Resultados	<input type="radio"/> 1º lugar	<input type="radio"/> 2º lugar	<input type="radio"/> 3º lugar	<input type="radio"/> 4º lugar	<input checked="" type="radio"/> 5º lugar	<input type="radio"/> 6º lugar

Reset

3. Compare el criterio que usted ha considerado en primer lugar con respecto al resto utilizando las siguientes etiquetas:

Recursos Humanos --> Programa Formativo	<input type="radio"/> II	<input type="radio"/> M+I	<input checked="" type="radio"/> +I	<input type="radio"/> Mu+I	<input type="radio"/> Ex+I	II: Igualmente importante M+I: Moderadamente más importante +I: Más importante Mu+I: Mucho más importante Ex+I: Extremadamente más importante
Recursos Humanos --> Organización de la enseñanza	<input type="radio"/> II	<input type="radio"/> M+I	<input type="radio"/> +I	<input checked="" type="radio"/> Mu+I	<input type="radio"/> Ex+I	
Recursos Humanos --> Recursos Materiales	<input type="radio"/> II	<input type="radio"/> M+I	<input type="radio"/> +I	<input checked="" type="radio"/> Mu+I	<input type="radio"/> Ex+I	
Recursos Humanos --> Proceso Formativo	<input type="radio"/> II	<input type="radio"/> M+I	<input type="radio"/> +I	<input checked="" type="radio"/> Mu+I	<input type="radio"/> Ex+I	
Recursos Humanos --> Resultados	<input type="radio"/> II	<input type="radio"/> M+I	<input type="radio"/> +I	<input checked="" type="radio"/> Mu+I	<input type="radio"/> Ex+I	

Reset

Seguir

Inicio \ 1-2-3 / 4-5-6 / 7-8-9 / 10-11-12 / 13-14-15 / 16-17-18 / 19-20-21 / 22-23-24-25 / RESULTADOS

Figura III.11.: Ejemplo de preguntas (1,2,3)

### Subcriterios o criterios de segundo nivel

El PEI establece 16 subcriterios o criterios de segundo nivel los cuales se agrupan de la siguiente manera.

Dentro del criterio 1. Programa formativo PF tenemos dos subcriterios 1.1. Objetivos del Programa Formativo OPF y 1.2. Plan de estudio y estructura. Las preguntas (4,5,6) de la encuesta se refieren a estos subcriterios, con la misma estructura de preguntas que en el caso de los criterios principales. Se puede ver un ejemplo en la Figura III.12.

4. ¿Cree que dentro del criterio principal 1 PROGRAMA FORMATIVO los subcriterios considerados (1.1. Objetivos del programa formativo, 1.2. Plan de estudios y su estructura) tiene el mismo peso a la hora de evaluar una titulación?

SI  NO

5. Escriba el orden de importancia que usted cree que debe tener cada uno de los subcriterios considerados dentro del criterio principal 1. Programa formativo

1.1 Objetivos del programa formativo	<input checked="" type="radio"/> 1º lugar	<input type="radio"/> 2º lugar
1.2 Plan de estudios y su estructura	<input type="radio"/> 1º lugar	<input checked="" type="radio"/> 2º lugar

Reset

6. Compare el subcriterio que usted ha considerado en primer lugar con respecto al que ha considerado en segundo utilizando las siguientes etiquetas:

Objetivos del programa formativo --> Plan de estudios y su estructura :  II  M+I  +I  Mu+I  Ex+I

Reset

II: Igualmente importante  
 M+I: Moderadamente más importante  
 +I: Más importante  
 Mu+I: Mucho más importante  
 Ex+I: Extremadamente más importante

Seguir

Inicio \ 1-2-3 / 4-5-6 / 7-8-9 / 10-11-12 / 13-14-15 / 16-17-18 / 19-20-21 / 22-23-24-25 / RESULTADOS

Figura III.12.: Ejemplo de preguntas (4,5,6)

Dentro del criterio 2. Organización de las enseñanzas OE tenemos igualmente dos subcriterios 2.1. Dirección y Planificación y 2.2. Gestión y Organización. Las preguntas (7,8,9) de la encuesta se refieren a estos subcriterios, con la misma estructura de preguntas que en el caso de los criterios principales. Se puede ver un ejemplo en la Figura III.13.

7. ¿Cree que dentro del criterio principal **2. ORGANIZACIÓN DE LA ENSEÑANZA** los subcriterios considerados (2.1. Dirección y planificación, 2.2. Gestión y organización) tiene el mismo peso a la hora de evaluar una titulación?

SI  NO

8. Escriba el orden de importancia que usted cree que debe tener cada uno de los subcriterios considerados dentro del criterio principal 2. Organización de la enseñanza

2.1 Dirección y planificación  1º lugar  2º lugar

2.2 Gestión y organización  1º lugar  2º lugar

9. Compare el subcriterio que usted ha considerado en primer lugar con respecto al que ha considerado en segundo utilizando las siguientes etiquetas:

Dirección y planificación --> Gestión y organización :  II  M+I  +I  Mu+I  Ex+I

II: Igualmente importante  
M+I: Moderadamente más importante  
+I: Más importante  
Mu+I: Mucho más importante  
Ex+I: Extremadamente más importante

Inicio / 1-2-3 / 4-5-6 / 7-8-9 / 10-11-12 / 13-14-15 / 16-17-18 / 19-20-21 / 22-23-24-25 / RESULTADOS

Figura III.13.: Ejemplo de preguntas (7,8,9)

Dentro del criterio 3. Recursos Humanos RH, tenemos igualmente dos subcriterios 3.1. Personal Académico PA y 3.2. Personal de Administración y Servicios PAS. Las preguntas (10,11,12) de la encuesta se refieren a estos subcriterios, con la misma estructura de preguntas que en el caso de los criterios principales. Se puede ver un ejemplo en la Figura III.14.

10. ¿Cree que dentro del criterio principal **3. RECURSOS HUMANOS** los subcriterios considerados (3.1. Personal académico, 3.2. Personal de administración y servicios) tiene el mismo peso a la hora de evaluar una titulación?

SI  NO

11. Escriba el orden de importancia que usted cree que debe tener cada uno de los subcriterios considerados dentro del criterio principal 3. Recursos Humanos

3.1 Personal académico  1º lugar  2º lugar

3.2 Personal de administración y servicios  1º lugar  2º lugar

12. Compare el subcriterio que usted ha considerado en primer lugar con respecto al que ha considerado en segundo utilizando las siguientes etiquetas:

Personal académico --> Personal de administración y servicios :  II  M+I  +I  Mu+I  Ex+I

II: Igualmente importante  
M+I: Moderadamente más importante  
+I: Más importante  
Mu+I: Mucho más importante  
Ex+I: Extremadamente más importante

Inicio / 1-2-3 / 4-5-6 / 7-8-9 / 10-11-12 / 13-14-15 / 16-17-18 / 19-20-21 / 22-23-24-25 / RESULTADOS

Figura III.14.: Ejemplo de preguntas (10,11,12)

13. ¿Cree que dentro del criterio principal **4. RECURSOS MATERIALES** los subcriterios considerados (4.1. Aulas, 4.2. Espacios de trabajo, 4.3. Laboratorios, talleres y espacios experimentales, 4.4. Biblioteca y fondos documentales) tiene el mismo peso a la hora de evaluar una titulación?

SI  NO

---

14. Escriba el orden de importancia que usted cree que debe tener cada uno de los subcriterios considerados dentro del criterio principal 4. Recursos Materiales

4.1- Aulas	<input type="radio"/> 1º lugar	<input type="radio"/> 2º lugar	<input type="radio"/> 3º lugar	<input checked="" type="radio"/> 4º lugar
4.2- Espacios de trabajo	<input type="radio"/> 1º lugar	<input type="radio"/> 2º lugar	<input checked="" type="radio"/> 3º lugar	<input type="radio"/> 4º lugar
4.3- Laboratorios, talleres y espacios experimentales	<input type="radio"/> 1º lugar	<input checked="" type="radio"/> 2º lugar	<input type="radio"/> 3º lugar	<input type="radio"/> 4º lugar
4.4- Biblioteca y fondos documentales	<input checked="" type="radio"/> 1º lugar	<input type="radio"/> 2º lugar	<input type="radio"/> 3º lugar	<input type="radio"/> 4º lugar

Reset

---

15. Compare el subcriterio que usted ha considerado en primer lugar con respecto al resto utilizando las siguientes etiquetas:

Biblioteca y fondos documentales --> Aulas	<input type="radio"/> II	<input checked="" type="radio"/> +I	<input type="radio"/> M+I	<input type="radio"/> Mu+I	<input type="radio"/> Ex+I
Biblioteca y fondos documentales --> Espacios de trabajo	<input type="radio"/> II	<input checked="" type="radio"/> +I	<input type="radio"/> M+I	<input type="radio"/> Mu+I	<input type="radio"/> Ex+I
Biblioteca y fondos documentales --> Laboratorios, talleres y espacios experimentales	<input checked="" type="radio"/> II	<input type="radio"/> +I	<input type="radio"/> M+I	<input type="radio"/> Mu+I	<input type="radio"/> Ex+I

II: Igualmente importante  
 M+I: Moderadamente más importante  
 +I: Más importante  
 Mu+I: Mucho más importante  
 Ex+I: Extremadamente más importante

Seguir

---

Inicio / 1-2-3 / 4-5-6 / 7-8-9 / 10-11-12 / 13-14-15 / 16-17-18 / 19-20-21 / 22-23-24-25 / RESULTADOS

Figura III.15.: Ejemplo de preguntas (13,14,15)

Dentro del criterio 4. Recursos materiales RM, tenemos 4 subcriterios 4.1.Aulas A, 4.2. Espacios de trabajo ET, 4.3. Laboratorios y talleres L y 4.4. Biblioteca y fondos B. Las preguntas (13,14,15) de la encuesta se refieren a estos subcriterios, con la misma estructura de preguntas que en el caso de los criterios principales. Se puede ver un ejemplo en la Figura III.15.

16. ¿Cree que dentro del criterio principal **6. PROCESO FORMATIVO** los subcriterios considerados (5.1. Acceso y formación integral, 5.2. Proceso enseñanza-aprendizaje) tiene el mismo peso a la hora de evaluar una titulación?

SI  NO

---

17. Escriba el orden de importancia que usted cree que debe tener cada uno de los subcriterios considerados dentro del criterio principal 5. Proceso Formativo

5.1 Acceso y formación integral	<input type="radio"/> 1º lugar	<input type="radio"/> 2º lugar
5.2 Proceso enseñanza-aprendizaje	<input checked="" type="radio"/> 1º lugar	<input type="radio"/> 2º lugar

Reset

---

18. Compare el subcriterio que usted ha considerado en primer lugar con respecto al que ha considerado en segundo utilizando las siguientes etiquetas:

Proceso enseñanza-aprendizaje --> Acceso y formación integral :	<input type="radio"/> II	<input checked="" type="radio"/> M+I	<input type="radio"/> +I	<input type="radio"/> Mu+I	<input type="radio"/> Ex+I
---	--------------------------	--------------------------------------	--------------------------	----------------------------	----------------------------

II: Igualmente importante  
 M+I: Moderadamente más importante  
 +I: Más importante  
 Mu+I: Mucho más importante  
 Ex+I: Extremadamente más importante

Seguir

---

Inicio / 1-2-3 / 4-5-6 / 7-8-9 / 10-11-12 / 13-14-15 / 16-17-18 / 19-20-21 / 22-23-24-25 / RESULTADOS

Figura III.16.: Ejemplo de preguntas (16,17,18)

19. ¿Cree que dentro del criterio principal 6, RESULTADOS los subcriterios considerados (6.1. Resultados del programa formativo, 6.2. Resultado en los egresados, 6.3. Resultados en el personal académico, 6.4. Resultados en la sociedad) tiene el mismo peso a la hora de evaluar una titulación?

SI  NO

20. Escriba el orden de importancia que usted cree que debe tener cada uno de los subcriterios considerados dentro del criterio principal 6. Resultados

6.1- Resultados de programa formativo	<input type="radio"/> 1º lugar	<input type="radio"/> 2º lugar	<input type="radio"/> 3º lugar	<input checked="" type="radio"/> 4º lugar
6.2- Resultado en los egresados	<input checked="" type="radio"/> 1º lugar	<input type="radio"/> 2º lugar	<input type="radio"/> 3º lugar	<input type="radio"/> 4º lugar
6.3- Resultados en el personal académico	<input type="radio"/> 1º lugar	<input checked="" type="radio"/> 2º lugar	<input type="radio"/> 3º lugar	<input type="radio"/> 4º lugar
6.4- Resultados en la sociedad	<input type="radio"/> 1º lugar	<input type="radio"/> 2º lugar	<input checked="" type="radio"/> 3º lugar	<input type="radio"/> 4º lugar

Reset

21. Compare el subcriterio que usted ha considerado en primer lugar con respecto al resto utilizando las siguientes etiquetas:

Resultado en los egresados --> Resultados de programa formativo	<input type="radio"/> II	<input type="radio"/> M+I	<input checked="" type="radio"/> +I	<input type="radio"/> Mu+I	<input type="radio"/> Ex+I
Resultado en los egresados --> Resultados en el personal académico	<input checked="" type="radio"/> II	<input type="radio"/> M+I	<input type="radio"/> +I	<input type="radio"/> Mu+I	<input type="radio"/> Ex+I
Resultado en los egresados --> Resultados en la sociedad	<input checked="" type="radio"/> II	<input type="radio"/> M+I	<input type="radio"/> +I	<input type="radio"/> Mu+I	<input type="radio"/> Ex+I

II: Igualmente importante  
 M+I: Moderadamente más importante  
 +I: Más importante  
 Mu+I: Mucho más importante  
 Ex+I: Extremadamente más importante

Seguir

Inicio / 1-2-3 / 4-5-6 / 7-8-9 / 10-11-12 / 13-14-15 / 16-17-18 / 19-20-21 / 22-23-24-25 / RESULTADOS

Figura III.17.: Ejemplo de preguntas (19,20,21)

Dentro del criterio 5. Proceso formativo PrF, tenemos 2 subcriterios 5.1. Acceso y formación integral AFI y 5.2. Proceso de enseñanza aprendizaje PEA. Las preguntas (16,17,18) de la encuesta se refieren a estos subcriterios, con la misma estructura de preguntas que en el caso de los criterios principales. Se puede ver un ejemplo en la Figura III.16.

Y finalmente dentro del criterio 6. Resultados R, tenemos 4 subcriterios, 6.1. Resultados del programa formativo RPF 6.2. Resultados de egresados RE, 6.3. Resultados en el personal académico RPA y 6.4. Resultados en la sociedad RS. Las preguntas (19,20,21) de la encuesta se refieren a estos subcriterios, con la misma estructura de preguntas que en el caso de los criterios principales. Se puede ver un ejemplo en la Figura III.17.

### III.2.3.2. SEGUNDA FASE DE LA ENCUESTA

La segunda parte del cuestionario se basa en la encuesta semicuantitativa de la Evaluación de la Enseñanza dentro del protocolo para elaborar el Informe de Evaluación Externa desarrollado por la ANECA, en el que se utilizan las siguientes etiquetas: A: Excelente, B: Bueno, C: Regular, D: Deficiente y EI: Evidencias Insuficientes [16]. Para la valoración de cada una de estas etiquetas se utilizó un intervalo de [0, 10], y se le preguntó a los expertos por la valoración que ellos tienen de cada una de las etiquetas dentro de este intervalo. Se puede ver un ejemplo en la Figura III.18.

22. Defina numéricamente entre [0,10] el valor de la etiqueta semicuantitativa A: Excelente	9
23. Defina numéricamente entre [0,10] el valor de la etiqueta semicuantitativa B: Bueno	7
24. Defina numéricamente entre [0,10] el valor de la etiqueta semicuantitativa C: Regular	4
25. Defina numéricamente entre [0,10] el valor de la etiqueta semicuantitativa D: Deficiente	2

Figura III.18.: Ejemplo de la pregunta de la segunda parte del cuestionario

### III.2.4. BASE DE DATOS A PARTIR DE LA ENCUESTA

Una vez obtenida la información de los expertos a partir del cuestionario se hace necesario la importación de la información a la base de datos. Para ello en la propia base de datos se ha implementado un sistema de importación de la información mediante un formulario de importación de datos como se puede ver en la Figura III.19.

Figura III.19: Formulario de importación de los datos de las encuestas de los expertos

De esta manera tenemos por un lado la información de los expertos correspondiente por un lado a las etiquetas semicuantitativas del IEE y por otra la valoración de los criterios establecidos en el PEI.

Ahora a partir de estos datos hay que agregar la información para obtener el peso de los criterios/subcriterios y la definición de las etiquetas semicuantitativas, proceso que desarrollaremos en el siguiente capítulo.

## CAPÍTULO III.3

### Agregación de información

---

#### III.3.1. INTRODUCCIÓN

Una vez importada toda la información, de las encuestas de los expertos, a la base de datos, sigue la generación de la información completa correspondiente a cada uno de los expertos.

Para ello tenemos la opción de generar la información para cada uno de los expertos de manera individual, para una selección de los mismos, o para todos. Ver Figura III.19.

Seguidamente vamos a analizar como se construye cada una de las matrices mediante la generación de toda la información a partir de los datos obtenidos de los expertos.

#### III.3.2. CONSTRUCCIÓN DE LAS MATRICES PARA CADA EXPERTO

En el cuestionario se le indicaba al experto que hiciera sus comparaciones utilizando las etiquetas lingüísticas definidas por Saaty [275], las cuales se han modelizado como números difusos triangulares según la siguiente tabla de equivalencias:

Tabla III.6: Escala de conversión difusa triangular

Escala lingüística		Escala Difusa Triangular	Escala recíproca difusa triangular
Igualmente importante	II	(1,1,1)	(1,1,1)
Moderadamente más importante	M+I	(2,3,4)	(1/4,1/3,1/2)
Más importante	+I	(4,5,6)	(1/6,1/5,1/4)
Mucho más importante	Mu+I	(6,7,8)	(1/8,1/7,1/6)
Extremadamente más importante	Ex+I	(8,9,9)	(1/9,1/9,1/8)

### III.3.2.1. MODELO TEÓRICO DE OBTENCIÓN DE DATOS

Veamos como ejemplo la generación para un experto, de toda la información de la matriz pareada para el caso de los 6 criterios principales a raíz de las preguntas (1,2,3) correspondientes a este nivel.

De este modo para el caso en el que un experto considera que todos los criterios tienen el mismo peso, es decir selecciono “Si” en la pregunta (1) la matriz completa correspondiente es aquella en la que todos sus elementos son (1,1,1).

	<i>PF</i>	<i>OE</i>	<i>RH</i>	<i>RM</i>	<i>PrF</i>	<i>R</i>
<i>PF</i>	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)
<i>OE</i>	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)
<i>RH</i>	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)
<i>RM</i>	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)
<i>PrF</i>	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)
<i>R</i>	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)

Para el caso en el que no todos los pesos de los criterios pesan igual, es decir en la pregunta (1) el experto selecciono “No”, este tuvo que contestar a las preguntas (2,3) veamos por ejemplo en el caso del experto 1 donde tenemos la siguiente información de la encuesta Figura III.20:

1. ¿Cree que todos los criterios principales (1. PROGRAMA FORMATIVO, 2. ORGANIZACIÓN DE LA ENSEÑANZA, 3. RECURSOS HUMANOS, 4. RECURSOS MATERIALES, 5. PROCESO FORMATIVO, 6. RESULTADOS) a la hora de evaluar una titulación tiene el mismo peso?

SI       NO

2. Escriba el orden de importancia que usted cree que debe tener cada uno de los criterios principales

1- Programa Formativo	<input type="radio"/> 1º lugar	<input type="radio"/> 2º lugar	<input checked="" type="radio"/> 3º lugar	<input type="radio"/> 4º lugar	<input type="radio"/> 5º lugar	<input type="radio"/> 6º lugar
2- Organización de la enseñanza	<input checked="" type="radio"/> 1º lugar	<input type="radio"/> 2º lugar	<input type="radio"/> 3º lugar	<input type="radio"/> 4º lugar	<input type="radio"/> 5º lugar	<input type="radio"/> 6º lugar
3- Recursos Humanos	<input type="radio"/> 1º lugar	<input checked="" type="radio"/> 2º lugar	<input type="radio"/> 3º lugar	<input type="radio"/> 4º lugar	<input type="radio"/> 5º lugar	<input type="radio"/> 6º lugar
4- Recursos Materiales	<input type="radio"/> 1º lugar	<input type="radio"/> 2º lugar	<input type="radio"/> 3º lugar	<input type="radio"/> 4º lugar	<input type="radio"/> 5º lugar	<input checked="" type="radio"/> 6º lugar
5- Proceso Formativo	<input type="radio"/> 1º lugar	<input type="radio"/> 2º lugar	<input type="radio"/> 3º lugar	<input checked="" type="radio"/> 4º lugar	<input type="radio"/> 5º lugar	<input type="radio"/> 6º lugar
6- Resultados	<input type="radio"/> 1º lugar	<input type="radio"/> 2º lugar	<input type="radio"/> 3º lugar	<input type="radio"/> 4º lugar	<input checked="" type="radio"/> 5º lugar	<input type="radio"/> 6º lugar

3. Compare el criterio que usted ha considerado en primer lugar con respecto al resto utilizando las siguientes etiquetas:

Organización de la enseñanza --> Programa Formativo	<input checked="" type="radio"/> II	<input type="radio"/> M+I	<input type="radio"/> +I	<input type="radio"/> Mu+I	<input type="radio"/> Ex+I	II: Igualmente importante M+I: Moderadamente más importante +I: Más importante Mu+I: Mucho más importante Ex+I: Extremadamente más importante
Organización de la enseñanza --> Recursos Humanos	<input checked="" type="radio"/> II	<input type="radio"/> M+I	<input type="radio"/> +I	<input type="radio"/> Mu+I	<input type="radio"/> Ex+I	
Organización de la enseñanza --> Recursos Materiales	<input type="radio"/> II	<input type="radio"/> M+I	<input checked="" type="radio"/> +I	<input type="radio"/> Mu+I	<input type="radio"/> Ex+I	
Organización de la enseñanza --> Proceso Formativo	<input type="radio"/> II	<input checked="" type="radio"/> M+I	<input type="radio"/> +I	<input type="radio"/> Mu+I	<input type="radio"/> Ex+I	
Organización de la enseñanza --> Resultados	<input type="radio"/> II	<input type="radio"/> M+I	<input checked="" type="radio"/> +I	<input type="radio"/> Mu+I	<input type="radio"/> Ex+I	

Inicio | 
 1-2-3 | 
 4-5-6 | 
 7-8-9 | 
 10-11-12 | 
 13-14-15 | 
 16-17-18 | 
 19-20-21 | 
 22-23-24-25 | 
 RESULTADOS

Figura III.20: Ejemplo información experto 1 para preguntas (1,2,3)

La pregunta 2 consiste en ordenar por grado de importancia los 6 criterios principales del primer al sexto lugar. Una vez hecha esta ordenación el sistema automáticamente genera la pregunta 3 donde se pide la comparación del criterio que se ha considerado en primer lugar en la pregunta 2 con respecto al resto de



	<i>OE</i>	<i>RH</i>	<i>PF</i>	<i>PrF</i>	<i>R</i>	<i>RM</i>
<i>OE</i>	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(2,3,4)	(4,5,6)	(4,5,6)
<i>RH</i>	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(2,3,4)	(4,5,6)	(4,5,6)
<i>PF</i>	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(2,3,4)	(4,5,6)	(4,5,6)
<i>PrF</i>	$(1/4, 1/3, 1/2)$	$(1/4, 1/3, 1/2)$	$(1/4, 1/3, 1/2)$	(1,1,1)	$(1, 5/3, 3)$	$(1, 5/3, 3)$
<i>R</i>	$(1/6, 1/5, 1/4)$	$(1/6, 1/5, 1/4)$	$(1/6, 1/5, 1/4)$	$(1/3, 3/5, 1)$	(1,1,1)	(1,1,1)
<i>RM</i>	$(1/6, 1/5, 1/4)$	$(1/6, 1/5, 1/4)$	$(1/6, 1/5, 1/4)$	$(1/3, 3/5, 1)$	(1,1,1)	(1,1,1)

Posteriormente a la obtención de toda la información de la matriz se hace una reordenación de la misma para poder así agregar la información de todos los expertos, quedando para este ejemplo de la siguiente manera:

	<i>PF</i>	<i>OE</i>	<i>RH</i>	<i>RM</i>	<i>PrF</i>	<i>R</i>
<i>PF</i>	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(4,5,6)	(2,3,4)	(4,5,6)
<i>OE</i>	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(4,5,6)	(2,3,4)	(4,5,6)
<i>RH</i>	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(4,5,6)	(2,3,4)	(4,5,6)
<i>RM</i>	$(1/6, 1/5, 1/4)$	$(1/6, 1/5, 1/4)$	$(1/6, 1/5, 1/4)$	(1,1,1)	$(1/3, 3/5, 1)$	(1,1,1)
<i>PrF</i>	$(1/4, 1/3, 1/2)$	$(1/4, 1/3, 1/2)$	$(1/4, 1/3, 1/2)$	$(1, 5/3, 3)$	(1,1,1)	$(1, 5/3, 3)$
<i>R</i>	$(1/6, 1/5, 1/4)$	$(1/6, 1/5, 1/4)$	$(1/6, 1/5, 1/4)$	(1,1,1)	$(1/3, 3/5, 1)$	(1,1,1)

Una vez reordenada la matriz calculamos el vector de pesos de la misma aplicando cualquiera de los métodos de estimación de los pesos del modelo AHP como por ejemplo el eigenvector, la media geométrica...

### III.3.2.2. MODELO PRÁCTICO

Debido a la forma de obtención de los datos por medio de  $(n - 1)$  comparaciones, resulta que todas las columnas son proporcionales y por lo tanto el peso de cada uno de los criterios se corresponde con el de una columna y en este caso si elegimos la primera no tendríamos que calcular todas las matrices sino que directamente de la información del experto obtendríamos el peso de la primera columna.

$$\begin{array}{l}
 PF \\
 OE \\
 RH \\
 RM \\
 Pr F \\
 R
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 PF \\
 (1,1,1) \\
 (1,1,1) \\
 (1,1,1) \\
 (1/6, 1/5, 1/4) \\
 (1/4, 1/3, 1/2) \\
 (1/6, 1/5, 1/4)
 \end{array}
 =
 \begin{array}{l}
 (0.2500, 0.2679, 0.2791) \\
 (0.2500, 0.2679, 0.2791) \\
 (0.2500, 0.2679, 0.2791) \\
 (0.0417, 0.0536, 0.0698) \\
 (0.0625, 0.0893, 0.1395) \\
 (0.0417, 0.0536, 0.0698)
 \end{array}$$

(3.583, 3.733, 4.000)

Para obtener el vector de pesos de la matriz del experto (en este caso el experto 1) utilizamos:

$$(w_{c_{ia}}, w_{c_{ib}}, w_{c_{ic}}) = \left( \frac{c_{ia}}{\sum_{i=1}^n c_{ic}}, \frac{c_{ib}}{\sum_{i=1}^n c_{ib}}, \frac{c_{ic}}{\sum_{i=1}^n c_{ia}} \right) \tag{III.3}$$

Una vez obtenidas las matrices para cada uno de los expertos y para cada uno de los criterios y subcriterios del primer y segundo nivel (haciendo como hemos comentado una distribución homogénea para el tercer nivel) nos encontramos en disposición de poder agregar toda esta información.

### III.3.3. DEFINICIÓN DE LOS CONJUNTOS DIFUSOS PARA LAS ETIQUETAS SEMICUANTITATIVAS

La ANECA ha definido las siguientes etiquetas semicuantitativas para utilizar en el cuestionario de la Evaluación de la Enseñanza dentro del protocolo para elaborar el IEE desarrollado por la ANECA, A: Excelente, B: Bueno, C: Regular, D: Deficiente y EI: Evidencias insuficientes.

En este apartado se plantea la agregación de la información de todos los expertos para los conjuntos difusos correspondientes a las etiquetas descritas, mediante números difusos triangulares, que se parametrizarán por una tripleta (a,b,c) [353;354]; según se estudió en el Bloque II: Metodología de la presente tesis doctoral; siendo:

$$(a, b, c) = (\bar{X} - t\sigma_x, \bar{X}, \bar{X} + t\sigma_x) \tag{III.4}$$

Siendo  $\bar{X}$  la media aritmética de los valores proporcionados por los expertos,  $\sigma_x$  la desviación típica y  $t = (1, 2, 3)$  una constante.

$$\bar{X}_{aritmética} = \frac{\sum_{j=1}^n X_j}{n} \tag{III.5}$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (X_j - \bar{X})^2}{n}} \quad (\text{III.6})$$

Siendo  $n$  el número de expertos

El resultado de la agregación de la información, obtenida de los expertos, para cada una de las etiquetas es diferente si lo hacemos para el conjunto total de expertos de la muestra o bien solo para aquellos que pertenecen al campo científico de enseñanzas técnicas, así como dependiendo del valor de  $t$  como se puede apreciar en la Tabla III.7 y las Figuras III.21, III.22 y III.23.

Tabla III.7: Definición de las etiquetas lingüísticas

Etiquetas semicuantitativas		General	Enseñanzas Técnicas
A: Excelente	t=1	(8.7704, 9.4054, 10.0000)	(8.4432, 9.0833, 9.7234)
	t=2	(8.1354, 9.4054, 10.0000)	(7.8031, 9.0833, 10.0000)
	t=3	(7.5004, 9.4054, 10.0000)	(7.1630, 9.0833, 10.0000)
B: Bueno	t=1	(6.4595, 7.1081, 7.7568)	(6.2806, 6.8333, 7.3861)
	t=2	(5.8108, 7.1081, 8.4054)	(5.7278, 6.8333, 7.9389)
	t=3	(5.1622, 7.1081, 9.0541)	(5.1750, 6.8333, 8.4916)
C: Regular	t=1	(4.1599, 4.8108, 5.4617)	(4.4607, 4.8333, 5.2060)
	t=2	(3.5090, 4.8108, 6.1126)	(4.0880, 4.8333, 5.5787)
	t=3	(2.8581, 4.8108, 6.7635)	(3.7153, 4.8333, 5.9514)
D: Deficiente	t=1	(1.6245, 2.5135, 3.4025)	(1.9432, 2.5833, 3.2234)
	t=2	(0.7355, 2.5135, 4.2916)	(1.3031, 2.5833, 3.8635)
	t=3	(0.0000, 2.5135, 5.1806)	(0.6630, 2.5833, 4.5036)

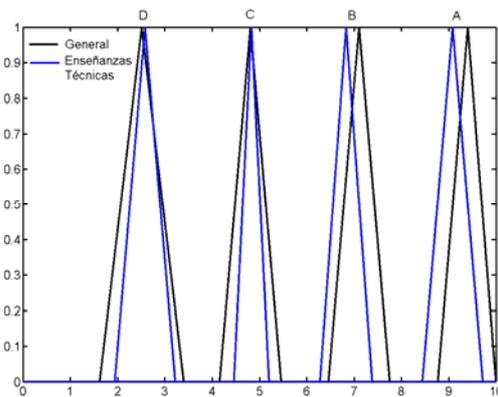


Figura III.21: Representación de las etiquetas lingüísticas para  $t=1$

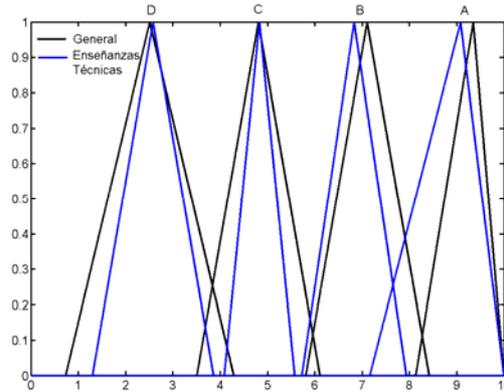


Figura III.22: Representación de las etiquetas lingüísticas para  $t=2$

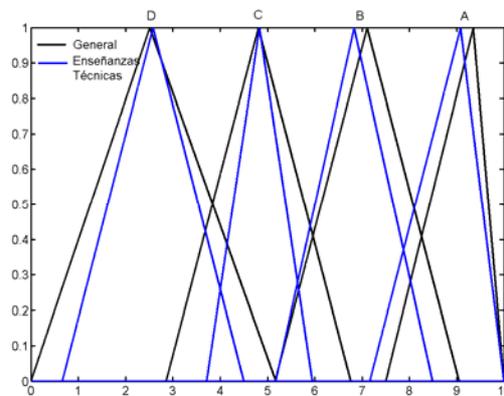


Figura III.23: Representación de las etiquetas lingüísticas para  $t=3$

Como se puede apreciar para el caso  $t=3$  tenemos números difusos con amplitud muy grande, es decir el intervalo soporte es demasiado grande y por tanto existe un gran solape entre las etiquetas. Asimismo como podemos apreciar en la definición de la etiqueta D para  $t=3$ , nos encontramos que para el caso general el valor inferior de la etiqueta sería 0 lo cual nos produciría un problema de división por cero en la programación de la aplicación. Por lo que hemos desestimado la programación de este caso de definición de etiquetas en la programación del SAD.

Finalmente de los tres casos considerados nos quedaremos con las dos primeras opciones de cara a la programación del SAD. pareciendo que la mas adecuada sería la correspondiente a  $t=2$  que sería equivalente a la distribución normal tal y como estudiamos a continuación.

### III.3.3.1. DISTRIBUCIÓN NORMAL

La distribución de una variable normal está completamente determinada por dos parámetros, su media y su desviación estándar, denotadas generalmente por  $\mu$  y  $\sigma$ . Con esta notación, la densidad de la normal viene dada por la ecuación:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{\frac{-1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right\} \quad -\infty < x < \infty \quad (\text{III.7})$$

Que determina la curva en forma de campana de Gauss ampliamente conocida Figura III.24. Así, se dice que una característica  $X$  (en nuestro caso una etiqueta lingüística) sigue una distribución normal de media  $\mu$  y varianza  $\sigma^2$ , y se denota  $X \approx N(\mu, \sigma)$ , si su función de densidad viene dada por la (III.7).

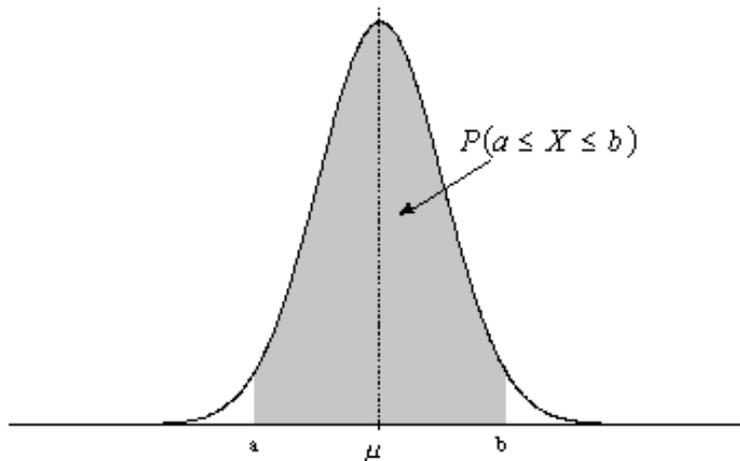


Figura III.24: Gráfica de una distribución normal y significado del área bajo la curva

Como se muestra en la Figura III.24, en el eje horizontal se levantan perpendiculares en dos puntos  $a$  y  $b$ , el área bajo la curva delimitada por esas líneas indica la probabilidad de que la variable de interés  $X$ , tome un valor cualquiera en ese intervalo. Puesto que la curva alcanza su mayor altura en torno a la media, mientras que sus “ramas” se extienden asintóticamente hacia los ejes, cuando una variable siga una distribución normal, será mucho más probable observar un dato cercano al valor medio que uno que se encuentre muy alejado de este.

### Propiedades de la distribución normal

La distribución normal posee ciertas propiedades importantes que conviene destacar:

1. Tiene un única moda, que coincide con su media y su mediana
2. La curva normal es asintótica al eje de abscisas. Por ello, cualquier valor entre  $-\infty$  y  $\infty$  es teóricamente posible. El área normal bajo la curva, es por tanto, igual a 1.
3. Es simétrica con respecto a su media  $\mu$ . Según esto para este tipo de variables existe una probabilidad de un 50% de observar un dato mayor que la media, y un 50% de observar un dato menor.
4. La distancia entre la línea trazada en la media y el punto de inflexión de la curva es igual a una desviación típica  $\sigma$ . Cuanto mayor sea  $\sigma$ , más aplanada será la curva de la densidad.

5. El área bajo la curva comprendida entre los valores situados aproximadamente a dos desviaciones estándar de la media es igual al 0.95. En concreto, existe el 95% de posibilidades de observar un valor comprendido en el intervalo  $(\mu - 1.96\sigma, \mu + 1.96\sigma)$ .
6. La forma de la campana de Gauss depende de los parámetros  $\mu$  y  $\sigma$ . La media indica la posición de la campana, de modo que para diferentes valores de  $\mu$  la gráfica está desplazada a lo largo del eje horizontal. Por otra parte, la desviación estándar determina el grado de apuntamiento de la curva. Cuanto mayor sea el valor de  $\sigma$ , más se dispersarán los datos en torno a la media y la curva será más plana. Un valor pequeño de este parámetro indica, por tanto, una probabilidad de obtener datos cercanos al valor medio de la distribución.

### III.3.3.2. ETIQUETAS EI (EVIDENCIAS INSUFICIENTES)

Dentro de la encuesta semicuantativa definida por la ANECA a parte de las etiquetas ya definidas y obtenidas a partir de los expertos (A, B, C y D), existe una etiqueta denominada EI (Evidencias Insuficientes), para aquellos subcriterios de los que no se ha dispuesto de datos o evidencias suficientes que permitan obtener los juicios de valor fundamentados en pruebas [16].

De cara a la programación del SAD es necesario generar esta información de manera estimativas, para poder evaluar las distintas alternativas.

Para ello lo que hemos hecho es hacer una estimación del valor de la etiqueta EI en cada caso como prorrateo del valor de las etiquetas en el resto de criterios de un mismo nivel, si no hubiera información de ninguna etiqueta en un determinado nivel, se haría el prorrateo de las etiquetas correspondientes a los criterios del nivel siguiente superior.

### III.3.4. PONDERACIÓN DE CRITERIOS Y SUBCRITERIOS

La toma de decisión en grupo, Chen y Hwang [83], Hwang y Yoon [156], Keeney y Raiffa [172], Luce y Raiffa [223], y Triantaphyllou [307], se define como el proceso que trata de seleccionar la mejor alternativa  $A_i$ ,  $i=1,2,\dots,n$  con  $n \geq 2$  para un conjunto de decisores o expertos  $E_k$ ,  $k=1,2,\dots,r$  con  $r \geq 2$  que tienen en cuenta unos criterios  $C_j$ ,  $j=1,2,\dots,m$  con  $m \geq 2$  sobre los que se evalúan las distintas alternativas; consideramos que  $n$ ,  $r$  y  $m$  son finitos.

Los procesos de decisión en grupo Keeney y Raiffa [172] se clasifican en función de:

- La importancia de los decisores.

Dependiendo de que los decisores tengan la misma o distinta importancia, clasificaremos los procesos de decisión en homogéneos o heterogéneos, respectivamente.

- El momento en el que se realiza la agregación de las utilidades/preferencias de los decisores.

Dependiendo del instante en el que se realiza la agregación diferenciaremos entre procesos primarios o secundarios. En los primeros la agregación se realiza sobre los juicios de los decisores creando de esta forma un único problema de decisión donde se han sintetizado las evaluaciones de los expertos, mientras que en la decisión secundaria se resuelve el problema para cada uno de los expertos y luego se agregan los resultados individuales.

En nuestro caso nos encontramos ante un proceso de decisión homogéneo dado que todos los expertos a priori van a tener el mismo peso en la decisión. Realizaremos un estudio del momento de la agregación de las preferencias de los decisores.

### III.3.4.1. PROCESO PRIMARIO

Este es el caso que nos ocupa, en el cual la agregación sobre los juicios de los expertos se hace sobre las matrices resultantes de la encuesta [131] enviada, basada en el Proceso Analítico Jerárquico [275;276], donde las matrices que se generan son simétricas y del tipo:

$$C = \begin{matrix} & c_1 & c_2 & \dots & c_n \\ \begin{matrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \end{matrix} & \begin{pmatrix} \tilde{1} & \tilde{c}_{12} & \dots & \tilde{c}_{1n} \\ 1/\tilde{c}_{12} & \tilde{1} & \dots & \tilde{c}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/\tilde{c}_{1n} & 1/\tilde{c}_{2n} & \dots & \tilde{1} \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (\text{III.8})$$

siendo  $C$  la matriz de comparación de los criterios,  $[c_1, c_2, \dots, c_n]$  son los criterios de evaluación y  $\tilde{C}_i$  un número triangular definido como  $(C_l, C_m, C_u)$  que nos proporciona el resultado de la comparación de dos criterios entre si.

Para conservar la simetría de las matrices y para cumplir las propiedades del AHP debe utilizarse como método de agregación la media geométrica según:

$$\bar{X}_{geométrica} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n X_i} \quad (\text{III.9})$$

Posteriormente a la agregación se calcula el peso de las matrices agregadas difusas. Para lo cual se utiliza el vector de peso difuso de una matriz simétrica difusa por el método de la media geométrica como:

$$V_i = \left( \prod_{j=1}^n \tilde{c}_{ij} \right)^{1/n} \quad (\text{III.10})$$

Por consiguiente, tenemos:

$$V_i = (\tilde{c}_{i1} * \tilde{c}_{i2} * \tilde{c}_{i3} * \dots * \tilde{c}_{in})^{1/n} \quad (\text{III.11})$$

El vector de pesos  $V$  se compone de los números triangulares difusos definidos como:

$$V = (V_1, V_2, \dots, V_n).$$

Se puede ver en la tabla III.8 los resultados de la ponderación de los criterios y subcriterios por un lado para todos los expertos y por otro para aquellos correspondientes al campo científico de enseñanzas técnicas, mediante proceso primario.[130]

### III.3.4.2. PROCESO SECUNDARIO

En este caso obtendremos el peso de cada una de las matrices para cada uno de los expertos y posteriormente realizamos la agregación de los pesos, para lo cual en este caso se puede utilizar tanto la media aritmética según (III.5) o la media geométrica según (III.9).

Los resultados de la ponderación de los criterios y subcriterios igualmente por un lado para todos los expertos y por otro para aquellos correspondientes al campo científico de enseñanzas técnicas, mediante proceso secundario (Tablas III.9 y III.10).

En nuestro SAD podremos hacer una selección del tipo de ponderación a utilizar en nuestro problema. Asimismo podremos seleccionar entre el tipo de expertos donde hacer la agregación, así podremos elegir entre todos los expertos de la base de datos o solo los expertos correspondientes al campo científico de las Enseñanzas Técnicas.

Asimismo podremos seleccionar el tipo de agregación sobre los juicios de los expertos entre: Primario Media Geométrica, Secundario Media Aritmética y Secundario Media Geométrica.

Podemos concluir que a nivel general para los tres tipos de agregación, el criterio más importante es el “Programa Formativo” y que la menor ponderación se obtiene para el criterio de “Recursos Materiales”. Esto también sucede tanto en el caso de la selección de todos los expertos o el caso de solo los expertos en el campo científico de las enseñanzas técnicas.

Asimismo también podemos observar como patrón que, en las tres opciones de agregación, el criterio que se considera en segundo lugar para la ponderación correspondiente a todos los expertos es el criterio de “Recursos Humanos”, mientras que en el caso del campo científico de las enseñanzas técnicas es el criterio de los “Resultados”.

Para el reto de criterios existen variaciones entre el tipo de agregación y el tipo de expertos utilizados para la misma.

Tabla III.8: Ponderación de criterios y subcriterios como proceso primario de decisión

CRITERIOS			Proceso primario para la ponderación general difusa mediante media geométrica			Proceso primario para la ponderación Enseñanzas Técnicas difusa mediante media geométrica		
1 er NIVEL	2º NIVEL	3er. NIVEL	3er. NIVEL	2º NIVEL	1er. NIVEL	3er. NIVEL	2º NIVEL	1er. NIVEL
1. Programa formativo	1.1. Objetivos del programa	Objetivos del P.F.	(3.39, <b>5.26</b> ,8.01)	(6.77, <b>10.52</b> ,16.02)	(16.61, <b>22.13</b> ,29.14)	(3.41, <b>5.87</b> ,9.74)	(6.83, <b>11.74</b> ,19.47)	(16.85, <b>22.92</b> ,30.70)
		Perfiles de ingreso	(3.39, <b>5.26</b> ,8.01)			(3.41, <b>5.87</b> ,9.74)		
	1.2. Plan de estudios y estructura	Contenido curricular	(1.50, <b>2.32</b> ,3.54)	(7.49, <b>11.61</b> ,17.72)		(1.31, <b>2.24</b> ,3.74)	(6.56, <b>11.18</b> ,18.69)	
		Coherencia curricular	(1.50, <b>2.32</b> ,3.54)			(1.31, <b>2.24</b> ,3.74)		
		Flexibilidad curricular	(1.50, <b>2.32</b> ,3.54)			(1.31, <b>2.24</b> ,3.74)		
		Actualización curricular	(1.50, <b>2.32</b> ,3.54)			(1.31, <b>2.24</b> ,3.74)		
Factibilidad del P.E.	(1.50, <b>2.32</b> ,3.54)	(7.49, <b>11.61</b> ,17.72)	(1.31, <b>2.24</b> ,3.74)	(6.56, <b>11.18</b> ,18.69)				
2. Organización de las enseñanzas	2.1. Dirección y Planificación	Planificación	(5.27, <b>7.94</b> ,11.81)	(5.27, <b>7.94</b> ,11.81)	(11.33, <b>15.10</b> ,20.04)	(5.61, <b>8.92</b> ,13.59)	(5.61, <b>8.92</b> ,13.59)	(12.59, <b>17.41</b> ,23.39)
	2.2. Organización y revisión	Comunicación	(1.59, <b>2.39</b> ,3.57)	(4.78, <b>7.16</b> ,10.70)		(1.80, <b>2.83</b> ,4.35)	(5.39, <b>8.49</b> ,13.05)	
		Organización de la enseñanza	(1.59, <b>2.39</b> ,3.57)			(1.80, <b>2.83</b> ,4.35)		
		Acciones de mejora	(1.59, <b>2.39</b> ,3.57)			(1.80, <b>2.83</b> ,4.35)		
3. Recursos humanos	3.1. Personal académico	Adecuación PDI	(5.11, <b>7.95</b> ,12.15)	(10.21, <b>15.90</b> ,24.29)	(14.44, <b>19.70</b> ,26.70)	(4.35, <b>6.83</b> ,10.52)	(8.70, <b>13.65</b> ,21.03)	(11.39, <b>15.88</b> ,21.95)
		Implicación PDI	(5.11, <b>7.95</b> ,12.15)			(4.35, <b>6.83</b> ,10.52)		
	3.2 P.A.S.	Adecuación PAS	(2.50, <b>3.79</b> ,5.94)	(2.50, <b>3.79</b> ,5.94)		(1.46, <b>2.23</b> ,3.53)	(1.46, <b>2.23</b> ,3.53)	
4. Recursos materiales	4.1 Aulas	Adecuadas n° alumnos	(1.58, <b>2.50</b> ,3.94)	(1.58, <b>2.50</b> ,3.94)	(7.55, <b>9.99</b> ,13.46)	(1.61, <b>2.83</b> ,4.87)	(1.61, <b>2.83</b> ,4.87)	(7.67, <b>10.55</b> ,14.60)
	4.2 Espacios de trabajo	Adecuados n° alumno	(0.51, <b>0.81</b> ,1.31)	(1.53, <b>2.44</b> ,3.93)		(0.38, <b>0.68</b> ,1.21)	(1.33, <b>2.03</b> ,3.63)	
		Adecuados PDI y PAS	(0.51, <b>0.81</b> ,1.31)			(0.38, <b>0.68</b> ,1.21)		
		Infraestructuras prácticas	(0.51, <b>0.81</b> ,1.31)			(0.38, <b>0.68</b> ,1.21)		
	4.3. Laboratorios y talleres	Adecuado n° alumnos	(1.82, <b>2.86</b> ,4.53)	(1.82, <b>2.86</b> ,4.53)		(2.13, <b>3.72</b> ,6.47)	(2.13, <b>3.72</b> ,6.47)	
	4.4. Biblioteca y fondos	Acondicionamiento	(0.69, <b>1.09</b> ,1.78)	(1.38, <b>2.19</b> ,3.56)		(0.56, <b>0.99</b> ,1.82)	(1.11, <b>1.97</b> ,3.64)	
Cantidad, calidad, ...		(0.69, <b>1.09</b> ,1.78)	(0.56, <b>0.99</b> ,1.82)					



Tabla III.9: Ponderación de criterios y subcriterios como proceso secundario de decisión mediante agregación por media aritmética

CRITERIOS			Proceso secundario para la ponderación General difusa mediante media aritmética			Proceso ssecundario para la ponderación Enseñanzas Técnicas difusa mediante media aritmética		
1 er NIVEL	2º NIVEL	3er. NIVEL	3er. NIVEL	2º NIVEL	1er. NIVEL	3er. NIVEL	2º NIVEL	1er. NIVEL
1. Programa formativo	1.1. Objetivos del programa	Objetivos del P.F.	(4.49, <b>5.33</b> ,6.16)	(8.99, <b>10.67</b> ,12.32)	(19.67, <b>22.08</b> ,24.26)	(4.70, <b>5.77</b> ,6.83)	(9.40, <b>11.54</b> ,13.65)	(19.97, <b>22.46</b> ,24.73)
		Perfiles de ingreso	(4.49, <b>5.33</b> ,6.16)			(4.70, <b>5.77</b> ,6.83)		
	1.2. Plan de estudios y estructura	Contenido curricular	(1.64, <b>2.28</b> ,3.26)	(8.20, <b>11.41</b> ,16.28)		(1.41, <b>2.18</b> ,3.45)		
		Coherencia curricular	(1.64, <b>2.28</b> ,3.26)			(1.41, <b>2.18</b> ,3.45)		
		Flexibilidad curricular	(1.64, <b>2.28</b> ,3.26)			(1.41, <b>2.18</b> ,3.45)		
		Actualización curricular	(1.64, <b>2.28</b> ,3.26)			(1.41, <b>2.18</b> ,3.45)		
		Factibilidad del P.E.	(1.64, <b>2.28</b> ,3.26)			(1.41, <b>2.18</b> ,3.45)		
2. Organización de las enseñanzas	2.1. Dirección y Planificación	Planificación	(5.90, <b>7.47</b> ,9.81)	(5.90, <b>7.47</b> ,9.81)	(6.91, <b>9.24</b> ,12.60)	(6.91, <b>9.24</b> ,12.60)		
	2.2. Organización y revisión	Comunicación	(1.62, <b>2.27</b> ,3.53)	(4.85, <b>6.82</b> ,10.58)	(1.96, <b>2.91</b> ,4.72)	(5.88, <b>8.74</b> ,14.16)		
		Organización de la enseñanza	(1.62, <b>2.27</b> ,3.53)		(1.96, <b>2.91</b> ,4.72)			
		Acciones de mejora	(1.62, <b>2.27</b> ,3.53)		(1.96, <b>2.91</b> ,4.72)			
3. Recursos humanos	3.1. Personal académico	Adecuación PDI	(5.85, <b>8.07</b> ,11.37)	(11.70, <b>16.41</b> ,22.75)	(5.07, <b>7.06</b> ,10.07)	(11.15, <b>14.12</b> ,22.15)		
		Implicación PDI	(5.85, <b>8.07</b> ,11.37)		(5.07, <b>7.06</b> ,10.07)			
	3.2 P.A.S.	Adecuación PAS	(3.11, <b>4.58</b> ,7.30)	(3.11, <b>4.58</b> ,7.30)	(15.46, <b>20.72</b> ,28.71)	(1.73, <b>2.59</b> ,4.16)	(1.73, <b>2.59</b> ,4.16)	(12.25, <b>16.70</b> ,23.57)
4. Recursos materiales	4.1 Aulas	Adecuadas n° alumnos	(1.79, <b>2.25</b> ,2.95)	(1.79, <b>2.25</b> ,2.95)	(7.78, <b>9.16</b> ,11.28)	(2.05, <b>2.59</b> ,3.28)	(2.05, <b>2.59</b> ,3.28)	
	4.2 Espacios de trabajo	Adecuados n° alumno	(0.56, <b>0.78</b> ,1.17)	(1.69, <b>2.35</b> ,3.52)		(0.47, <b>0.66</b> ,0.97)	(1.40, <b>1.97</b> ,2.92)	
		Adecuados PDI y PAS	(0.56, <b>0.78</b> ,1.17)			(0.47, <b>0.66</b> ,0.97)		
		Infraestructuras prácticas	(0.56, <b>0.78</b> ,1.17)			(0.47, <b>0.66</b> ,0.97)		
	4.3. Laboratorios y talleres	Adecuado n° alumnos	(1.86, <b>2.60</b> ,3.89)	(1.86, <b>2.60</b> ,3.89)		(2.32, <b>3.30</b> ,4.82)	(2.32, <b>3.30</b> ,4.82)	
	4.4. Biblioteca y fondos	Acondicionamiento	(0.69, <b>0.98</b> ,1.54)	(1.39, <b>1.96</b> ,3.07)		(0.55, <b>0.80</b> ,1.35)	(1.10, <b>1.61</b> ,2.70)	
Cantidad, calidad, ...		(0.69, <b>0.98</b> ,1.54)	(0.55, <b>0.80</b> ,1.35)		(8.17, <b>9.47</b> ,11.24)			



Tabla III.10: Ponderación de criterios y subcriterios como proceso secundario de decisión mediante agregación por media geométrica

CRITERIOS			Proceso secundario para la ponderación General difusa mediante media geométrica			Proceso secundario para la ponderación Enseñanzas Técnicas difusa mediante media geométrica		
1 er NIVEL	2º NIVEL	3er. NIVEL	3er. NIVEL	2º NIVEL	1er. NIVEL	3er. NIVEL	2º NIVEL	1er. NIVEL
1. Programa formativo	1.1. Objetivos del programa	Objetivos del P.F.	(2.89, <b>5.26</b> ,9.37)	(5.78, <b>10.52</b> ,18.75)	(15.32, <b>22.13</b> ,31.54)	(2.89, <b>5.87</b> ,11.51)	(5.78, <b>11.74</b> ,23.01)	(15.66, <b>22.92</b> ,33.04)
		Perfiles de ingreso	(2.89, <b>5.26</b> ,9.37)			(2.89, <b>5.87</b> ,11.51)		
	1.2. Plan de estudios y estructura	Contenido curricular	(1.10, <b>2.32</b> ,4.81)	(5.51, <b>11.61</b> ,24.07)		(0.89, <b>2.24</b> ,5.53)	(4.43, <b>11.18</b> ,27.64)	
		Coherencia curricular	(1.10, <b>2.32</b> ,4.81)			(0.89, <b>2.24</b> ,5.53)		
		Flexibilidad curricular	(1.10, <b>2.32</b> ,4.81)			(0.89, <b>2.24</b> ,5.53)		
		Actualización curricular	(1.10, <b>2.32</b> ,4.81)			(0.89, <b>2.24</b> ,5.53)		
	Factibilidad del P.E.	(1.10, <b>2.32</b> ,4.81)		(0.89, <b>2.24</b> ,5.53)				
2. Organización de las enseñanzas	2.1. Dirección y Planificación	Planificación	(4.14, <b>7.94</b> ,15.05)	(4.14, <b>7.94</b> ,15.05)	(9.29, <b>15.10</b> ,24.45)	(4.40, <b>8.92</b> ,17.37)	(4.40, <b>8.92</b> ,17.37)	(10.35, <b>17.41</b> ,28.46)
	2.2. Organización y revisión	Comunicación	(1.11, <b>2.39</b> ,5.11)	(3.33, <b>7.16</b> ,15.34)		(1.23, <b>2.83</b> ,6.34)	(3.70, <b>8.49</b> ,19.03)	
		Organización de la enseñanza	(1.11, <b>2.39</b> ,5.11)			(1.23, <b>2.83</b> ,6.34)		
		Acciones de mejora	(1.11, <b>2.39</b> ,5.11)			(1.23, <b>2.83</b> ,6.34)		
3. Recursos humanos	3.1. Personal académico	Adecuación PDI	(4.32, <b>7.95</b> ,14.34)	(8.63, <b>15.90</b> ,28.69)	(11.53, <b>19.70</b> ,33.36)	(3.89, <b>6.83</b> ,11.65)	(7.78, <b>13.65</b> ,23.29)	(9.54, <b>15.88</b> ,25.97)
		Implicación PDI	(4.32, <b>7.95</b> ,14.34)			(3.89, <b>6.83</b> ,11.65)		
	3.2 P.A.S.	Adecuación PAS	(1.86, <b>3.79</b> ,7.96)	(1.86, <b>3.79</b> ,7.96)		(1.17, <b>2.23</b> ,4.38)	(1.17, <b>2.23</b> ,4.38)	
4. Recursos materiales	4.1 Aulas	Adecuadas n° alumnos	(1.21, <b>2.50</b> ,5.15)	(1.21, <b>2.50</b> ,5.15)	(6.18, <b>9.99</b> ,16.34)	(1.36, <b>2.83</b> ,5.76)	(1.36, <b>2.83</b> ,5.76)	(6.84, <b>10.55</b> ,16.36)
	4.2 Espacios de trabajo	Adecuados n° alumno	(0.36, <b>0.81</b> ,1.86)	(1.08, <b>2.44</b> ,5.57)		(0.29, <b>0.68</b> ,1.58)	(0.87, <b>2.03</b> ,4.73)	
		Adecuados PDI y PAS	(0.36, <b>0.81</b> ,1.86)			(0.29, <b>0.68</b> ,1.58)		
		Infraestructuras prácticas	(0.36, <b>0.81</b> ,1.86)			(0.29, <b>0.68</b> ,1.58)		
	4.3. Laboratorios y talleres	Adecuado n° alumnos	(1.28, <b>2.86</b> ,6.42)	(1.28, <b>2.86</b> ,6.42)		(1.63, <b>3.72</b> ,8.43)	(1.63, <b>3.72</b> ,8.43)	
	4.4. Biblioteca y fondos	Acondicionamiento	(0.47, <b>1.09</b> ,2.61)	(0.94, <b>2.19</b> ,5.22)		(0.39, <b>0.99</b> ,2.57)	(0.79, <b>1.97</b> ,5.13)	
Cantidad, calidad, ...		(0.47, <b>1.09</b> ,2.61)	(0.39, <b>0.99</b> ,2.57)					





## CAPÍTULO III.4

### SADRU-II

---

#### III.4.1. INTRODUCCIÓN

El software propiamente desarrollado para el S.A.D, al que hemos denominado SADRU-II, se ha programado en Delphi y se ha estructurado en los distintos pasos de la metodología implementada. A efectos de esta tesis doctoral, se han dejado en “abierto” los distintos pasos del algoritmo desarrollado a efectos de ver la aplicación del mismo, pero como trabajo futuro sería interesante hacer una versión del software en modo “usuario”, no en modo “experto” como podría considerarse la versión de aplicación de esta tesis.

#### III.4.1. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE SADRU-II

El título del SAD implementado es “SAD para el Ranking de Universidades en el ámbito de la Ingeniería Industrial SADRU-II”. Ver figura III.25.



Figura III.25: Inicio del Software

El software se presenta como un ejecutable (SADRU-II.exe) junto con la base de datos en Access anteriormente descrita.

## Paso 0. Selección de Universidades y Titulaciones

Como paso inicial del SAD se debe seleccionar la relación de universidades-titulaciones que se quieren evaluar de entre las existentes en la base de datos, las cuales el software ha importado de la base de datos original.

Universidad	Titulación	Selección
Castilla La Mancha	Ingeniero Industrial	<input type="checkbox"/>
de Navarra	Ingeniero Industrial	<input type="checkbox"/>
de Zaragoza	Ingeniero Industrial	<input type="checkbox"/>
Politécnica de Cartagena	Ingeniero Industrial	<input type="checkbox"/>
de Sevilla	Ingeniero en Organización Industrial	<input type="checkbox"/>
Politécnica de Cartagena	Ingeniero en Organización Industrial	<input type="checkbox"/>
Politécnica de Valencia (Alcoi)	Ingeniero en Organización Industrial	<input type="checkbox"/>
Politécnica de Valencia (Vera)	Ingeniero en Organización Industrial	<input type="checkbox"/>
Politécnica de Madrid	Ingeniero Industrial	<input type="checkbox"/>
Castilla La Mancha	Ingeniero Técnico Industrial en electrónica indust	<input type="checkbox"/>
Jaime I	Ingeniero Técnico Industrial en mecánica	<input type="checkbox"/>
de Salamanca	Ingeniero Técnico Industrial en mecánica	<input type="checkbox"/>
Politécnica de Valencia (Vera)	Ingeniero Químico	<input type="checkbox"/>
de Murcia	Ingeniero Químico	<input type="checkbox"/>
de Sevilla	Ingeniero en Electrónica	<input type="checkbox"/>
de Sevilla	Ingeniero en Automática y electrónica industrial	<input type="checkbox"/>
de la Laguna	Ingeniero Químico	<input type="checkbox"/>
Politécnica de Madrid	Ingeniero Técnico Industrial en electricidad	<input type="checkbox"/>
Politécnica de Madrid	Ingeniero Técnico Industrial en electrónica indust	<input type="checkbox"/>
Politécnica de Madrid	Ingeniero Técnico Industrial en mecánica	<input type="checkbox"/>
Politécnica de Madrid	Ingeniero Técnico Industrial en Química Industrial	<input type="checkbox"/>
de Zaragoza	Ingeniero Técnico en diseño industrial	<input checked="" type="checkbox"/>

Continuar

Figura III.26: Paso 0. Selección de Universidades Titulaciones a estudio

La selección se debe hacer al gusto del usuario, a modo de ejemplo:

- Selección de una misma titulación: para la evaluación de la misma en todas las universidades disponibles.
- Selección de titulaciones por proximidad geográfica: para evaluación de titulaciones por áreas geográficas, lo cual podría ser de interés para potenciales “clientes” de dichas titulaciones.
- Selección varias titulaciones de una misma universidad: Para ver que evaluación tienen unas respecto a otras
- Etc.

## Paso 1. Establecer Matriz de Decisión

Una vez hecha la selección de las universidades-titulaciones, las cuales constituirán nuestro conjunto de alternativas a valorar en la matriz de decisión

que se genera. (Ver tabla I.1 del Bloque I Introducción para ver la estructura de una matriz de valoración), debemos hacer una selección de otros tres elementos que nos van a generar la matriz de decisión definitiva Figura III.27:

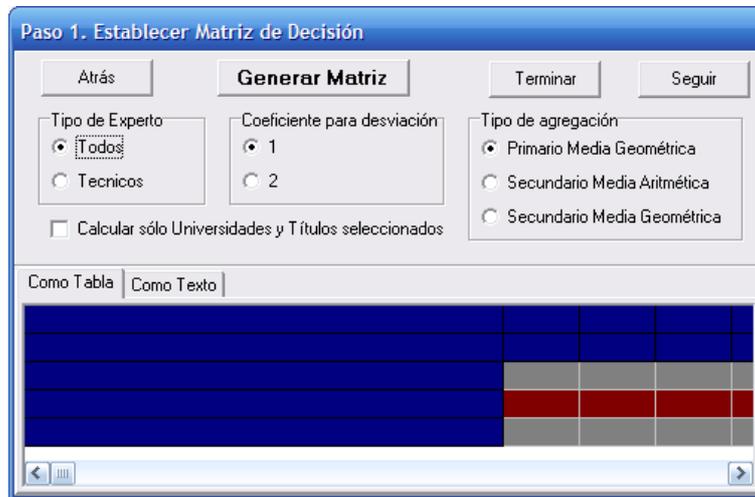


Figura III.27: Establecer matriz de decisión

El primer ítem a seleccionar es por un lado el tipo de expertos que queremos elegir de la base de datos, para que sea la información de estos (la obtenida de sus encuestas), la que nos determine el peso de los criterios/subcriterios. De esta manera tenemos:

- Todos: El peso de los criterios/subcriterios de todos los expertos disponibles en la base de datos
- Técnicos: El peso de los criterios/subcriterios de los expertos del campo científico de las enseñanzas técnicas, los cuales ya han sido registrados como tales en la base de datos original

Se ha realizado esta clasificación de expertos a la hora de determinar el peso de los criterios/subcriterios ya que es posible que la valoración de un experto del campo de las enseñanzas técnicas no valore de la misma forma los criterios que otro experto del campo de las humanidades.

El segundo ítem a seleccionar para generar la matriz de decisión objeto de estudio, es el tipo de agregación de la información obtenida de la encuesta a los expertos, así de los tipos de agregación implementados en la base de datos tenemos:

- Primario Media Geométrica
- Secundario Media Aritmética
- Secundario Media Geométrica

Se ha realizado esta clasificación para ver como varía el tipo de agregación en el peso final de los criterios/subcriterios.

Y finalmente como tercer ítem a seleccionar tenemos el “coeficiente de desviación” que se corresponde con los valores de  $t$  para la definición de las etiquetas lingüísticas utilizadas en los IEE. Como vimos en el apartado III.3.3. hemos programado las opciones correspondientes a  $t = 1$  y  $2$ .

Una vez realizada la selección de los tres ítems se puede proceder a genera la matriz de decisión que será objeto de valoración. Bien para la selección previa realizada o bien para todas las Universidades-Titulaciones existentes en la base de datos.

Para la matriz podemos tener dos tipos de salida de datos, bien como tabla o bien como texto.

La valoración de esta matriz de decisión se va a realizar mediante el algoritmo TOPSIS clásico y el algoritmo TOPSIS modificado (desarrollado en el bloque II. Metodología) para ver las ventajas que aporta uno frente al otro.

Con la matriz de decisión generada, tenemos la opción de “Seguir” con el siguiente paso del algoritmo, “Atrás” si queremos hacer variaciones en la selección previa o “Salir” si nos queremos salir del sistema.

## **Paso 2: Normalización**

Una vez construida la matriz de decisión que va a ser evaluada, el siguiente paso del algoritmo es la normalización de la matriz, para ello hemos implementados las siguientes opciones según la Tabla II.12 comparativa de procedimientos del Bloque II:

- Procedimiento 0: Es el caso en el que no se realiza normalización a la matriz. Esta opción es posible para este ejemplo en particular dado que los atributos de la matriz ya tienen la misma escala de vector para todos sus elementos, pero esto no siempre ocurre así como por ejemplo en casos donde la matriz de decisión esté compuesta por criterios que se cuantifiquen de manera numérica con diversas escalas, lingüística, etc.
- Procedimiento 1: Es el procedimiento correspondiente al método TOPSIS clásico
- Procedimiento 2
- Procedimiento 3: Es el procedimiento de normalización que proponemos como una de las modificaciones al método TOPSIS clásico.
- Procedimiento 4: Lo presentamos pero finalmente no ha sido programado por los problemas ya comentados en la implementación del mismo con números difusos.

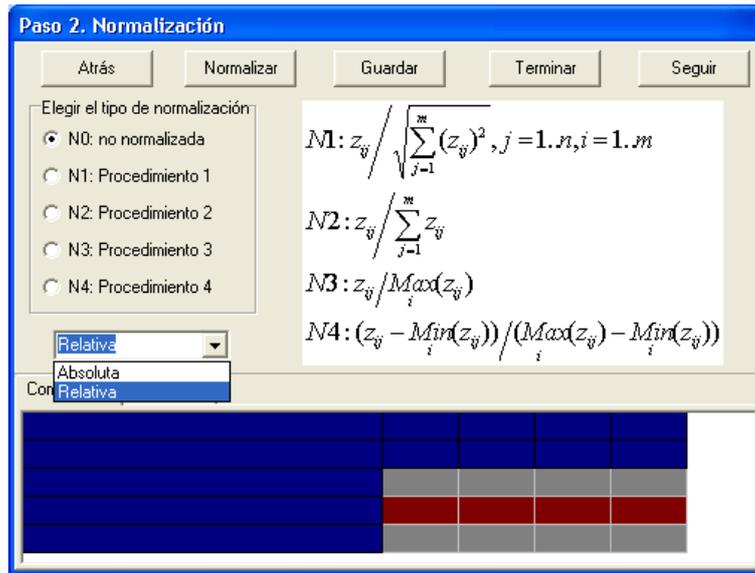


Figura III.28: Paso 2 Normalización

Una vez seleccionado el tipo de procedimiento de normalización sigue seleccionar el modo de operación del algoritmo bien de modo relativo o bien de modo absoluto (como vimos en el Bloque II metodología). Realizada la opción deseada sigue “Normalizar”, de igual modo podemos tener dos tipos de salida de datos, bien como tabla o bien como texto.

De esta manera seleccionando el procedimiento 1 con el modo relativo operaremos la matriz de decisión mediante el método TOPSIS clásico, mientras que si seleccionamos el procedimiento 3 con el modo absoluto operaremos mediante el método TOPSIS modificado.

Con la matriz de decisión normalizada, al igual que para las siguientes pantallas, tenemos la opción de “Seguir” con el siguiente paso del algoritmo, “Atrás” si queremos hacer variaciones en la selección previa, “Guardar” si queremos guardarlo en un fichero de texto o “Terminar” si nos queremos salir del sistema.

### Paso 3: Ponderación de la matriz normalizada

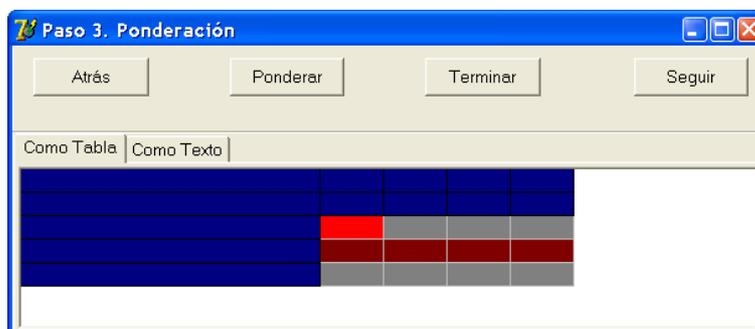


Figura III.29: Paso 2. Ponderación

El siguiente paso del algoritmo es la ponderación de la matriz de decisión normalizada. Para ello se selecciona la opción “Ponderar” y de de igual modo podemos tener dos tipos de salida de datos, bien como tabla o bien como texto.

#### Paso 4: Calculo del FPIS y del FNIS

El siguiente paso del algoritmo es el cálculo de las soluciones ideales positiva y negativa difusas, las cuales vendrán condicionadas por el modo de operación seleccionado previamente, relativo o absoluto. Para ello se selecciona la opción “Calcular” y de de igual modo podemos tener dos tipos de salida de datos, bien como tabla o bien como texto.

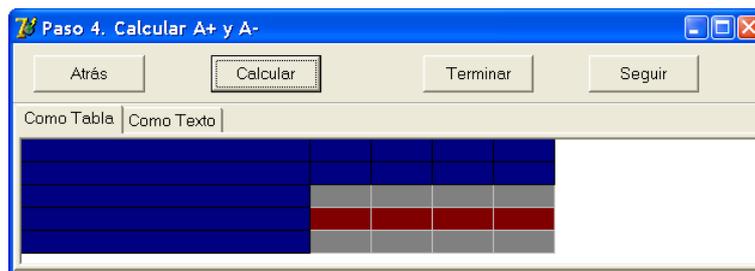


Figura III.30: Paso 4 Calculo de  $A^+$  y  $A^-$

#### Paso 5: Calculo de las medidas de distancia

Una vez obtenidos  $A^+$  y  $A^-$ , se pasa al cálculo de la separación de cada solución a la  $A^+$  y  $A^-$ , mediante  $d^+$  y  $d^-$ . Para ello se selecciona la opción “Calcular” y de de igual modo podemos tener dos tipos de salida de datos, bien como tabla o bien como texto.

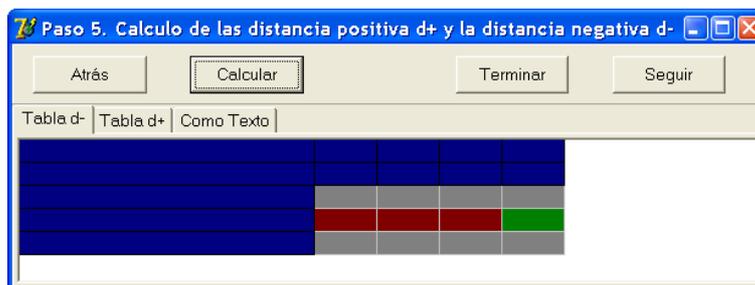
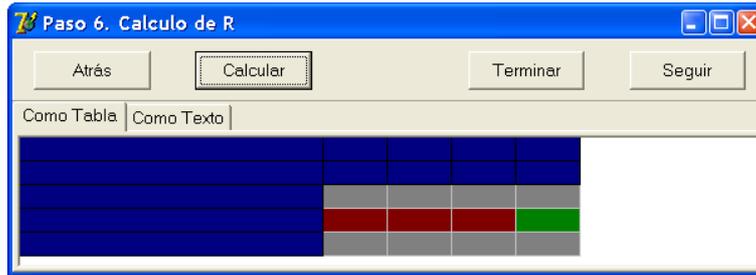


Figura III.31: Paso 5 Calculo de  $d^+$  y  $d^-$

#### Paso 6: Calculo de la proximidad relativa a la solución ideal

A partir de las distancias  $d^+$  y  $d^-$  se calcula la proximidad relativas a la solución ideal mediante  $R$ , seleccionando la opción “Calcular” y de de igual modo podemos tener dos tipos de salida de datos, bien como tabla o bien como texto.

Figura III.32: Paso 6 Calculo  $R$ 

### Paso 7: Defuzzificación

Una vez calculado  $R$  y dado que este es un valor difuso corresponde ahora obtener el valor defuzzificado de  $R$ , para ello utilizaremos el Índice de Garcia-Cascales y Lamata [133] que desarrollamos en el Bloque II de Metodología. Para ello debemos seleccionar los valores del índice de optimismo  $\lambda \in [0,1]$  y el índice de modalidad  $\beta \in [0,1]$ . Igualmente seleccionamos la opción de “Calcular” y asimismo tendremos dos tipos de salida de datos, bien como tabla o bien como texto.



Figura III.33: Paso 7 Defuzzificación

### Paso 8: Ranking

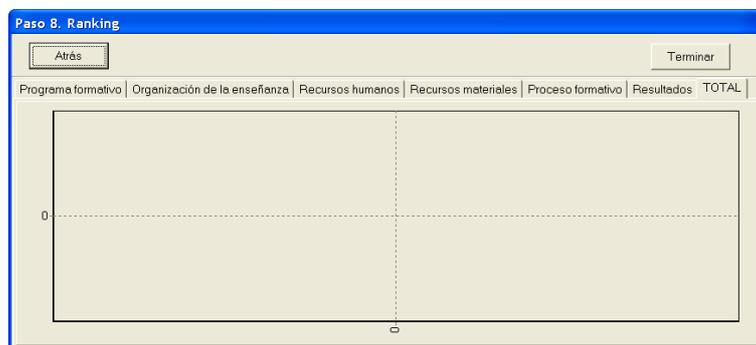


Figura III.34: Paso 8 Ranking

Finalmente como último paso del SAD tendríamos la salida gráfica de los resultados obtenidos, con la ordenación de las alternativas para cada uno de los criterios principales: 1. Programa formativo, 2. Organización de la enseñanza, 3.

Recursos Humanos, 4. Recursos Materiales, 5. Programa Formativo, 6. Resultados, así como para el resultado Total de los mismos.

Esta salida de resultados será diferente en el caso de utilizar el modo “relativo” o hacerlo con el modo “absoluto” como podremos comprobar en el ejemplo del caso de estudio.

En este punto solo tenemos la opción de “Terminar” o “Atrás” en el caso de querer hacer modificaciones en opciones previas.

### III.4.1. DESARROLLO DE UN CASO

Una vez descrito el software del SAD parece interesante presentar a modo de ejemplo el estudio de un caso. Para ello vamos a ver el análisis del caso a estudio desde los dos algoritmos de la base de modelos, mediante el TOPSIS clásico y el TOPSIS modificado.

Para ello vamos a ver el caso en el que seleccionemos todas las universidades-titulaciones, disponibles en la base de datos.

Para establecer la matriz de decisión seleccionaremos la información correspondientes a “Todos” los expertos, para la obtención de los pesos de los criterios, como tipo de agregación la “Primario Media Geométrica” y como coeficiente de desviación para la definición de las etiquetas de evaluación “t=2”.

Paso 1. Establecer Matriz de Decisión

Atrás **Generar Matriz** Terminar Seguir

Tipo de Experto:  
 Todos  
 Tecnicos

Coficiente para desviación:  
 1  
 2

Tipo de agregación:  
 Primario Media Geométrica  
 Secundario Media Aritmética  
 Secundario Media Geométrica

Calcular sólo Universidades y Titulos seleccionados

Como Tabla Como Texto

	1.inf	1.med	1.sup	2.inf	2.med	2.sup
<b>Pesos</b>	<b>0.033875</b>	<b>0.052612</b>	<b>0.080098</b>	<b>0.033875</b>	<b>0.052612</b>	<b>0.080098</b>
U6-Ingeniero Industrial	0.73547	2.5135	4.2916	5.8108	7.1081	8.4054
U20-Ingeniero Industrial	5.8108	7.1081	8.4054	3.509	4.8108	6.1126
U32-Ingeniero Industrial	5.8108	7.1081	8.4054	3.509	4.8108	6.1126
U23-Ingeniero Industrial	0.73547	2.5135	4.2916	0.73547	2.5135	4.2916
U29-Ingeniero en Organización Industrial	0.73547	2.5135	4.2916	3.509	4.8108	6.1126
U23-Ingeniero en Organización Industrial	0.73547	2.5135	4.2916	0.73547	2.5135	4.2916
U35-Ingeniero en Organización Industrial	3.509	4.8108	6.1126	3.509	4.8108	6.1126
U25-Ingeniero en Organización Industrial	5.8108	7.1081	8.4054	3.509	4.8108	6.1126
U36-Ingeniero Industrial	5.8108	7.1081	8.4054	3.509	4.8108	6.1126
U6-Ingeniero Técnico Industrial en electrónica indust	3.509	4.8108	6.1126	3.509	4.8108	6.1126
U13-Ingeniero Técnico Industrial en mecánica	5.8108	7.1081	8.4054	0.73547	2.5135	4.2916
U28-Ingeniero Técnico Industrial en mecánica	3.509	4.8108	6.1126	3.509	4.8108	6.1126
U25-Ingeniero Químico	3.509	4.8108	6.1126	5.8108	7.1081	8.4054
U37-Ingeniero Químico	3.509	4.8108	6.1126	0.73547	2.5135	4.2916
U29-Ingeniero en Electrónica	0.73547	2.5135	4.2916	5.8108	7.1081	8.4054
U29-Ingeniero en Automática y electrónica industrial	0.73547	2.5135	4.2916	5.8108	7.1081	8.4054
U38-Ingeniero Químico	5.8108	7.1081	8.4054	5.8108	7.1081	8.4054
U36-Ingeniero Técnico Industrial en electricidad	3.509	4.8108	6.1126	5.8108	7.1081	8.4054
U36-Ingeniero Técnico Industrial en electrónica indust	3.509	4.8108	6.1126	5.8108	7.1081	8.4054
U36-Ingeniero Técnico Industrial en mecánica	3.509	4.8108	6.1126	5.8108	7.1081	8.4054
U36-Ingeniero Técnico Industrial en Química Industrial	3.509	4.8108	6.1126	5.8108	7.1081	8.4054
U32-Ingeniero Técnico en diseño industrial	3.509	4.8108	6.1126	3.509	4.8108	6.1126

Figura III.35: Generación de la Matriz de decisión

Una vez generada la matriz de decisión de nuestro problema como hemos dicho desarrollaremos nuestro caso por las dos vías comentadas: TOPSIS clásico y TOPSIS modificado.

### III.4.1.1. MÉTODO TOPSIS CLÁSICO

Como comentamos con anterioridad en la descripción del software en el paso del algoritmo correspondiente a la normalización de la matriz la opción: Procedimiento 1 y modo relativo se corresponde con el método TOSPIIS clásico.

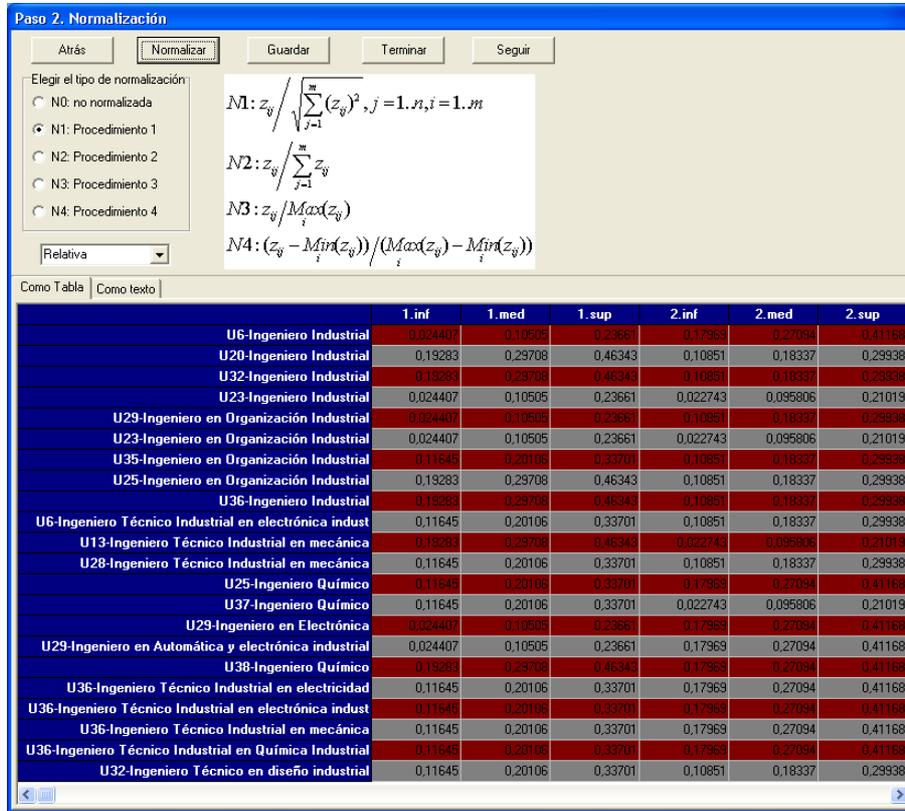


Figura III.36: Normalización correspondiente a TOPSIS clásico.

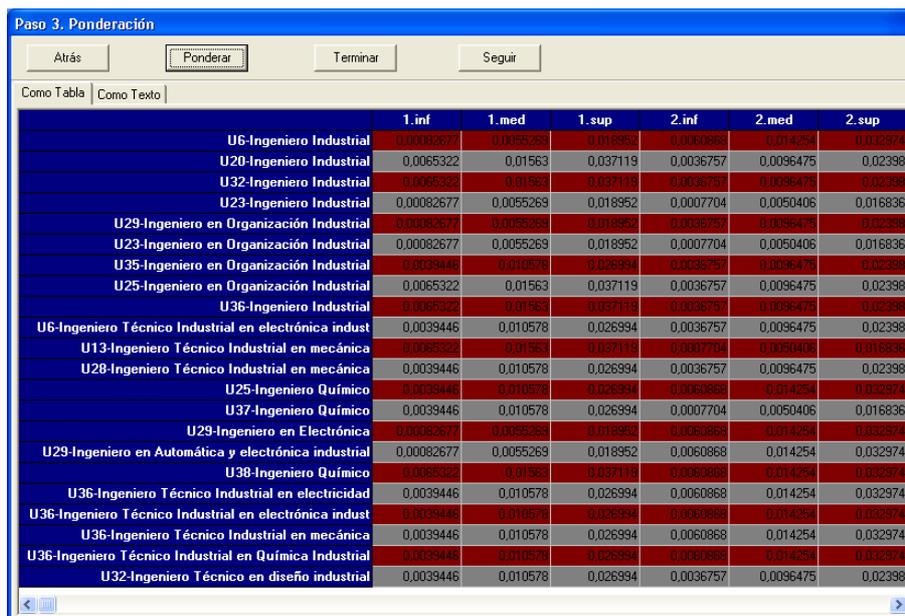


Figura III.37: Ponderación correspondiente a TOPSIS clásico.

**Paso 4. Calcular A+ y A-**

Atrás  Terminar Seguir

Como Tabla  Como Texto

	1.inf	1.med	1.sup	2.inf	2.med	2.sup
A+	0.0065322	0.01563	0.037119	0.0060868	0.014254	0.032974
A-	0.00082677	0.0055269	0.018952	0.0007704	0.0050406	0.016836

Figura III.38: Valores  $A^+$  y  $A^-$  en el método TOPSIS clásico

**Paso 5. Calculo de las distancia positiva  $d^+$  y la distancia negativa  $d^-$**

Atrás  Terminar Seguir

Tabla  $d^-$   Tabla  $d^+$   Como Texto

	1.inf	1.med	1.sup	2.inf	2.med	2.sup
U6-Ingeniero Industrial	0.0059793	0.010328	0.01784	0.0057933	0.0088811	0.01337
U20-Ingeniero Industrial	0.0082618	0.014519	0.025196	0.0091659	0.015015	0.025538
U32-Ingeniero Industrial	0.0077652	0.013516	0.023539	0.012141	0.020203	0.031407
U23-Ingeniero Industrial	0	0	0	0	0	0
U29-Ingeniero en Organización Industrial	0.0033843	0.0053928	0.0094372	0.0050635	0.0075834	0.011447
U23-Ingeniero en Organización Industrial	0	0	0	0	0	0
U35-Ingeniero en Organización Industrial	0.0047284	0.0075445	0.012211	0.0049834	0.0075628	0.011598
U25-Ingeniero en Organización Industrial	0.0071131	0.012275	0.0213	0.0062075	0.0098811	0.016381
U36-Ingeniero Industrial	0.0072688	0.01258	0.022102	0.0088125	0.014268	0.023835
U6-Ingeniero Técnico Industrial en electrónica indust	0.0050171	0.0081488	0.012824	0.0061159	0.0094771	0.01455
U13-Ingeniero Técnico Industrial en mecánica	0.0053503	0.011178	0.019707	0.0051254	0.0078203	0.012211
U28-Ingeniero Técnico Industrial en mecánica	0.0044456	0.0071212	0.011192	0.0050635	0.0075834	0.011447
U25-Ingeniero Químico	0.0077573	0.013395	0.023338	0.012495	0.020753	0.032235
U37-Ingeniero Químico	0.0043555	0.0072629	0.012175	0.012414	0.020677	0.032056
U29-Ingeniero en Electrónica	0.0051086	0.010587	0.018596	0.0058906	0.009084	0.013829
U29-Ingeniero en Automática y electrónica industrial	0.0051086	0.010587	0.018596	0.0058906	0.009084	0.013829
U38-Ingeniero Químico	0.0053071	0.015481	0.029532	0.0098125	0.014268	0.023835
U36-Ingeniero Técnico Industrial en electricidad	0.0065678	0.011195	0.019237	0.0050089	0.0075076	0.011305
U36-Ingeniero Técnico Industrial en electrónica indust	0.0065678	0.011195	0.019237	0.0050089	0.0075076	0.011305
U36-Ingeniero Técnico Industrial en mecánica	0.0065678	0.011195	0.019237	0.0050089	0.0075076	0.011305
U36-Ingeniero Técnico Industrial en Química Industrial	0.0065678	0.011195	0.019237	0.0050089	0.0075076	0.011305
U32-Ingeniero Técnico en diseño industrial	0.0050295	0.0082674	0.013583	0.0089543	0.014503	0.023981

Figura III.39: Valores  $d^+$  y  $d^-$  en el método TOPSIS clásico

**Paso 6. Calculo de R**

Atrás  Terminar Seguir

Como Tabla  Como Texto

	1.inf	1.med	1.sup	2.inf	2.med	2.sup
U6-Ingeniero Industrial	0.14396	0.43688	1.3362	0.16263	0.3904	0.98612
U20-Ingeniero Industrial	0.22732	0.71911	2.2517	0.26483	0.68189	1.9448
U32-Ingeniero Industrial	0.21938	0.68738	2.1616	0.30767	0.81089	2.1276
U23-Ingeniero Industrial	0	0	0	0	0	0
U29-Ingeniero en Organización Industrial	0.098108	0.2732	0.74957	0.14321	0.33984	0.95829
U23-Ingeniero en Organización Industrial	0	0	0	0	0	0
U35-Ingeniero en Organización Industrial	0.14256	0.39956	1.1243	0.13959	0.33343	0.85336
U25-Ingeniero en Organización Industrial	0.1943	0.5977	1.8671	0.1665	0.42626	1.1965
U36-Ingeniero Industrial	0.20138	0.62468	1.977	0.25907	0.65522	1.8329
U6-Ingeniero Técnico Industrial en electrónica indust	0.15049	0.42971	1.2011	0.16937	0.41304	1.0653
U13-Ingeniero Técnico Industrial en mecánica	0.1525	0.47728	1.495	0.14457	0.3487	0.91012
U28-Ingeniero Técnico Industrial en mecánica	0.13051	0.36375	1.0067	0.14321	0.33984	0.85829
U25-Ingeniero Químico	0.21943	0.68824	2.1107	0.32498	0.85251	2.2545
U37-Ingeniero Químico	0.12141	0.35806	1.0568	0.2922	0.78519	2.0573
U29-Ingeniero en Electrónica	0.14643	0.45133	1.4057	0.15921	0.38919	0.99521
U29-Ingeniero en Automática y electrónica industrial	0.14643	0.45133	1.4057	0.15921	0.38919	0.99521
U38-Ingeniero Químico	0.27732	0.85242	2.7362	0.25507	0.65522	1.8329
U36-Ingeniero Técnico Industrial en electricidad	0.17551	0.5268	1.6105	0.1467	0.34478	0.8684
U36-Ingeniero Técnico Industrial en electrónica indust	0.17551	0.5268	1.6105	0.1467	0.34478	0.8684
U36-Ingeniero Técnico Industrial en mecánica	0.17551	0.5268	1.6105	0.1467	0.34478	0.8684
U36-Ingeniero Técnico Industrial en Química Industrial	0.17551	0.5268	1.6105	0.1467	0.34478	0.8684
U32-Ingeniero Técnico en diseño industrial	0.14357	0.41664	1.2129	0.2389	0.62544	1.7335

Figura III.40: Valores de  $R$  en el método TOPSIS clásico

Los resultados defuzzificados de  $R$  que se obtiene para el método TOPSIS clásico son, suponiendo el caso de un decisor neutral donde  $\beta = 1/3$  y  $\lambda = 1/2$ .

Paso 7. Defuzzificación

$\beta$  0,33333
 

 $\lambda$  0,50000

Como Tabla  Como Texto

	1	2	3	4	5	6	7
U6-Ingeniero Industrial	0,53753	0,45173	0,60756	0,59364	0,40207	0,84181	0,62446
U20-Ingeniero Industrial	0,89258	0,82287	0,83894	0,96364	1,0293	1,1676	0,93256
U32-Ingeniero Industrial	0,85506	0,94646	0,83894	0,44747	0,84177	0,83785	0,84823
U23-Ingeniero Industrial	0	0	0,19072	0,34368	0,24031	0,23009	0,16559
U29-Ingeniero en Organización Industrial	0,32344	0,39344	0,35405	0,54025	0,18345	0,2167	0,32561
U23-Ingeniero en Organización Industrial	0	0	0,19072	0,34368	0,24031	0,23009	0,16559
U35-Ingeniero en Organización Industrial	0,47753	0,39763	0,19072	0,63611	0,71377	0,94391	0,54829
U25-Ingeniero en Organización Industrial	0,74204	0,51134	0,64366	1,0476	0,68525	0,80984	0,67911
U36-Ingeniero Industrial	0,77948	0,78481	0,57887	0,28117	0,65108	0,65773	0,68146
U6-Ingeniero Técnico Industrial en electrónica indust	0,51173	0,48114	0,40347	0,72513	0,56817	0,57955	0,50593
U13-Ingeniero Técnico Industrial en mecánica	0,59271	0,40631	0,35405	0,24025	0,78024	0,25116	0,46826
U28-Ingeniero Técnico Industrial en mecánica	0,43204	0,39348	0,19072	0,82359	0,51885	0,46552	0,41253
U25-Ingeniero Químico	0,84325	1,0067	0,80756	0,60247	0,91962	0,83785	0,86118
U37-Ingeniero Químico	0,43508	0,91504	0,64366	0,44365	0,80002	0,82901	0,72226
U29-Ingeniero en Electrónica	0,55961	0,45186	0,83894	0,81451	0,57663	0,38068	0,55412
U29-Ingeniero en Automática y electrónica industrial	0,55961	0,45186	0,83894	0,81486	0,57663	0,38068	0,55412
U38-Ingeniero Químico	1,0704	0,78481	0,84919	1,0467	0,71662	0,82133	0,85097
U36-Ingeniero Técnico Industrial en electricidad	0,64887	0,39903	0,35405	0,26449	0,34843	0,17657	0,40732
U36-Ingeniero Técnico Industrial en electrónica indust	0,64887	0,39903	0,35405	0,26449	0,34843	0,17657	0,40732
U36-Ingeniero Técnico Industrial en mecánica	0,64887	0,39903	0,35405	0,26449	0,34843	0,17657	0,40732
U36-Ingeniero Técnico Industrial en Química Industrial	0,64887	0,39903	0,35405	0,26449	0,34843	0,17657	0,40732
U32-Ingeniero Técnico en diseño industrial	0,50383	0,7457	0,40347	0,59739	0,84964	0,73992	0,63455

Figura III.41: Resultados defuzzificados correspondiente al algoritmo TOPSIS clásico.

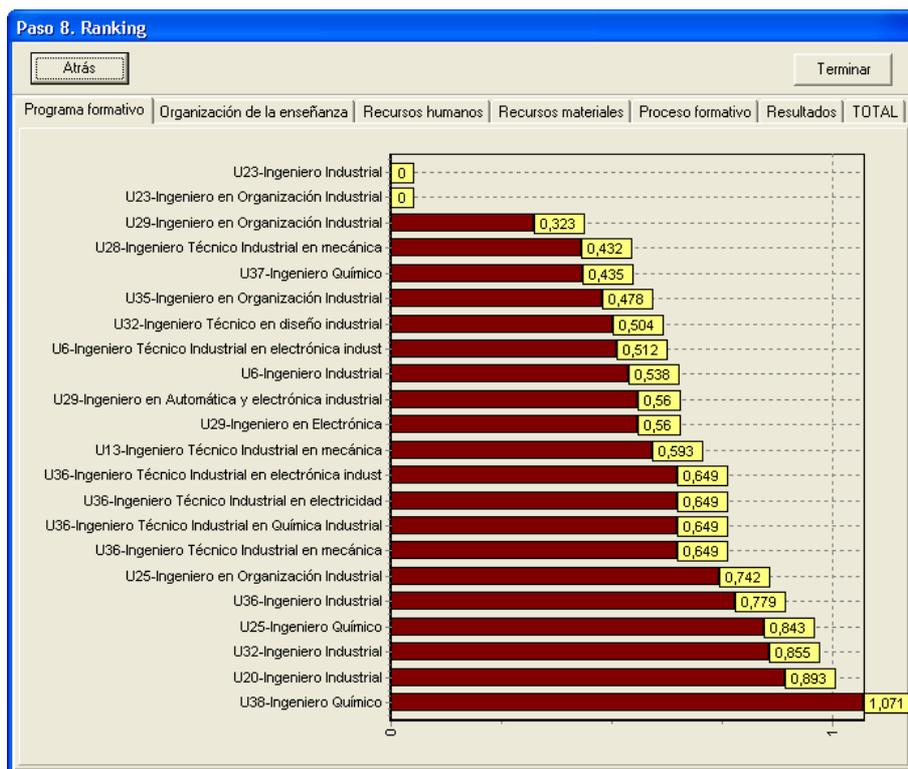


Figura III.42: Ranking para el criterio 1 Programa Formativo correspondiente al algoritmo TOPSIS clásico

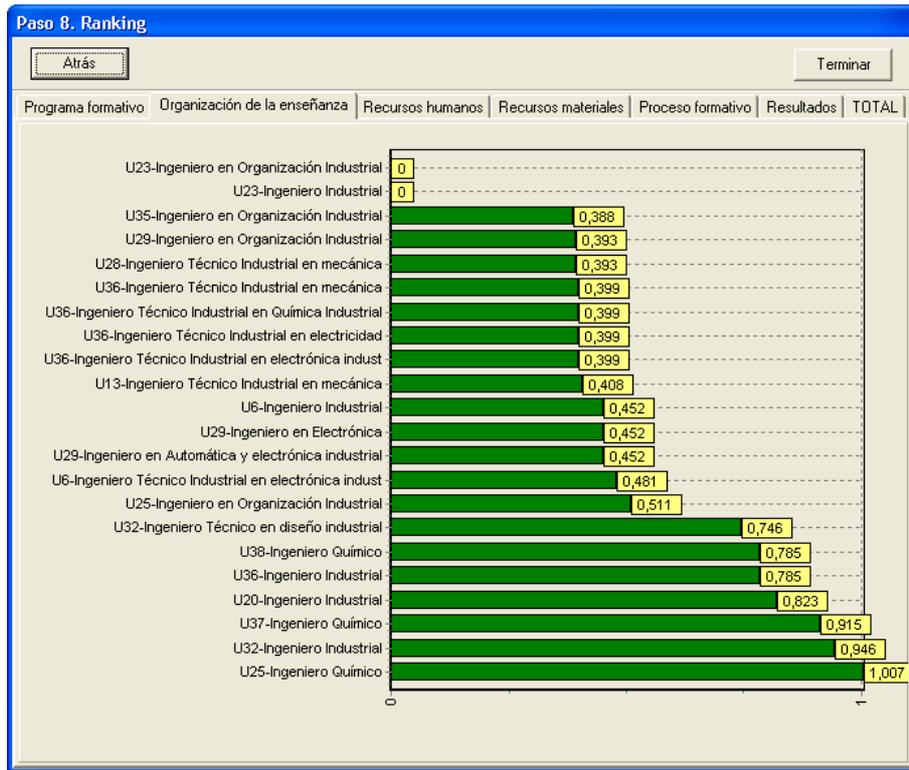


Figura III.43: Ranking para el criterio 2. Organización de la enseñanza correspondiente al algoritmo TOPSIS clásico

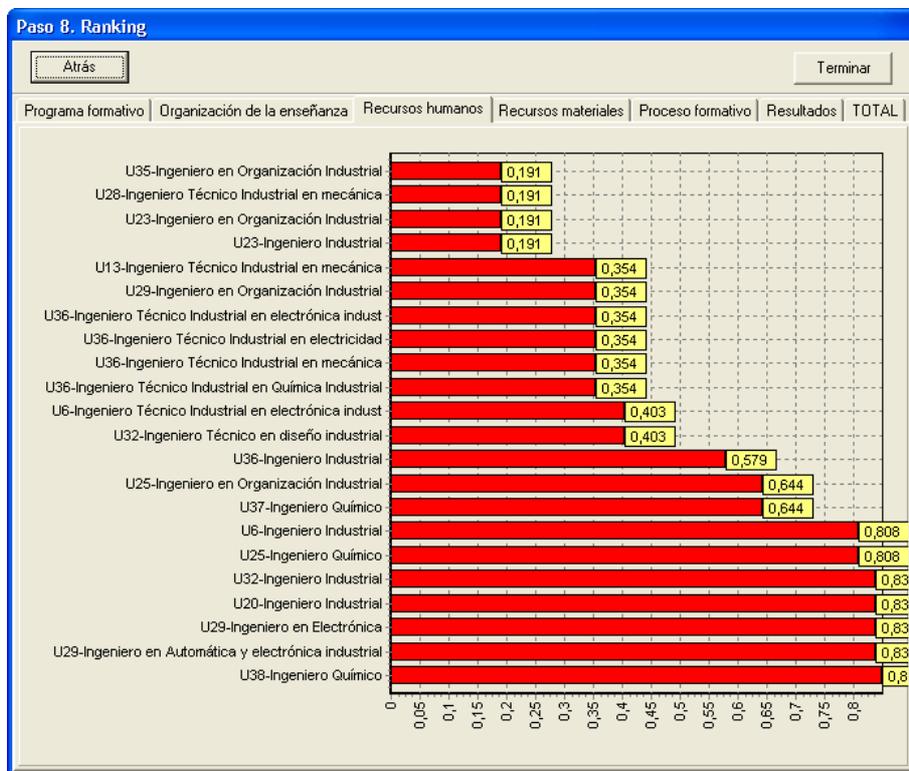


Figura III.44: Ranking para el criterio 3 Recursos Humanos correspondiente al algoritmo TOPSIS clásico

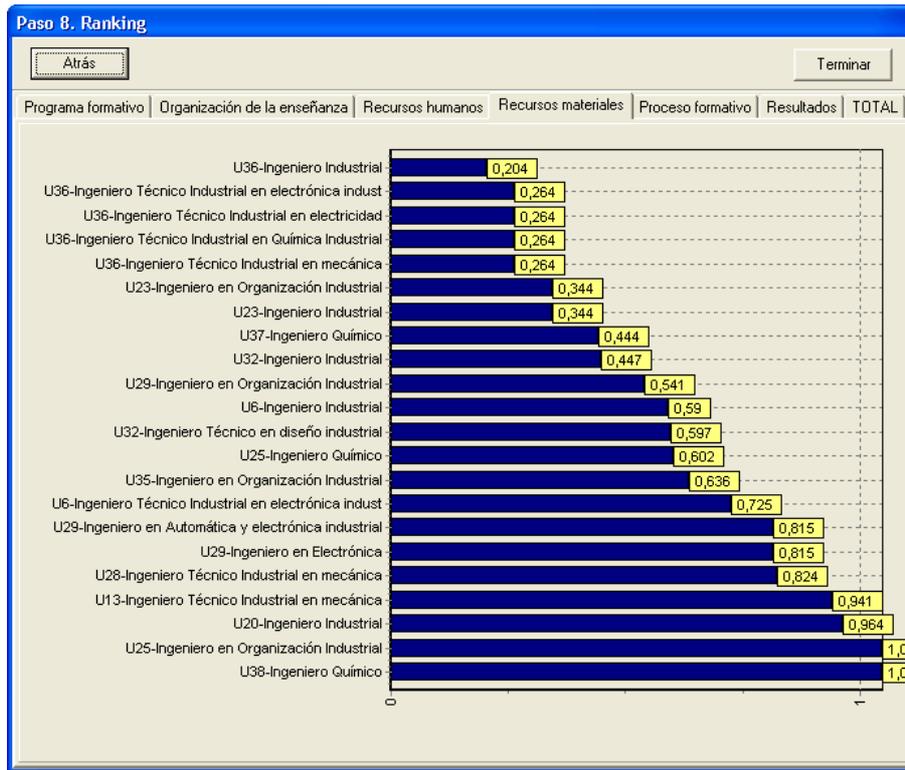


Figura III.45: Ranking para el criterio 4 Recursos materiales correspondiente al algoritmo TOPSIS clásico

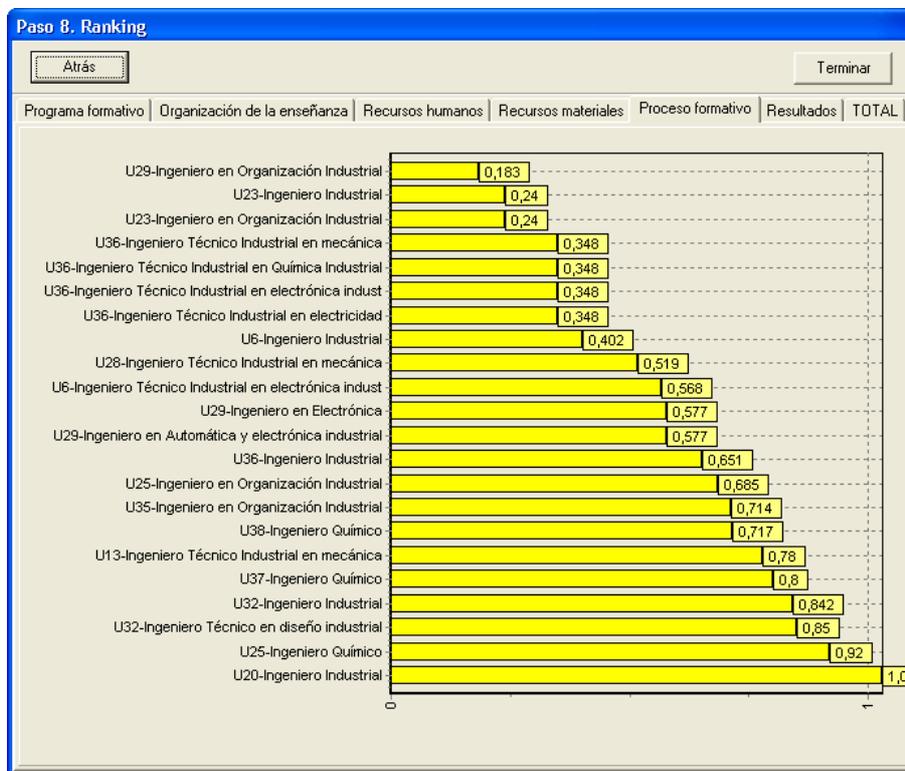


Figura III.46: Ranking para el criterio 5 Proceso Formativo correspondiente al algoritmo TOPSIS clásico

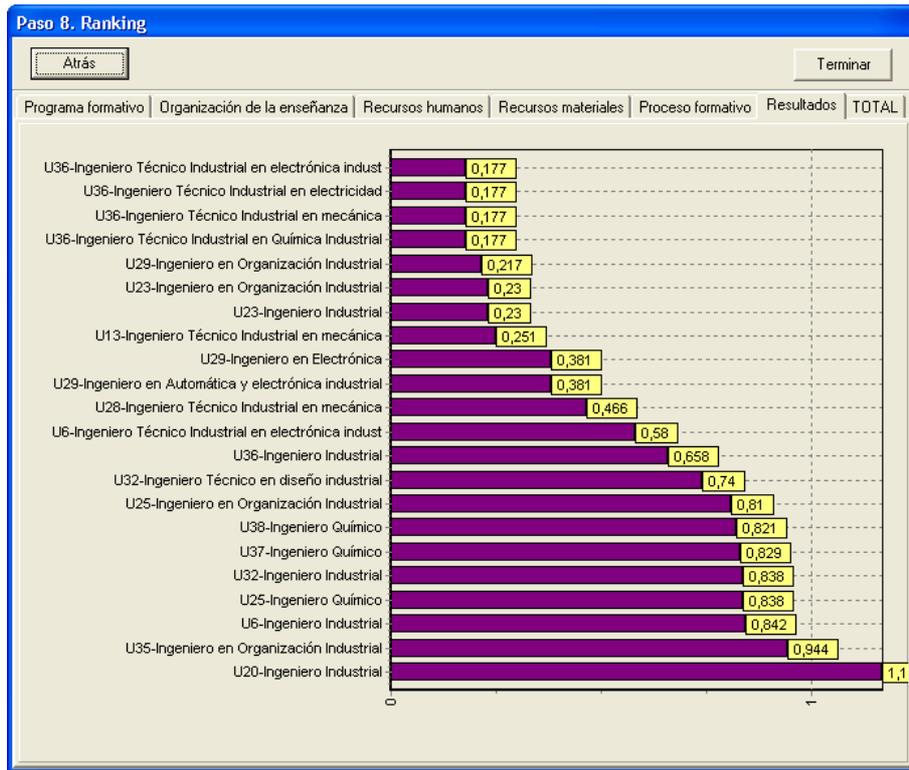


Figura III.47: Ranking para el criterio 6 Resultados correspondiente al algoritmo TOPSIS clásico

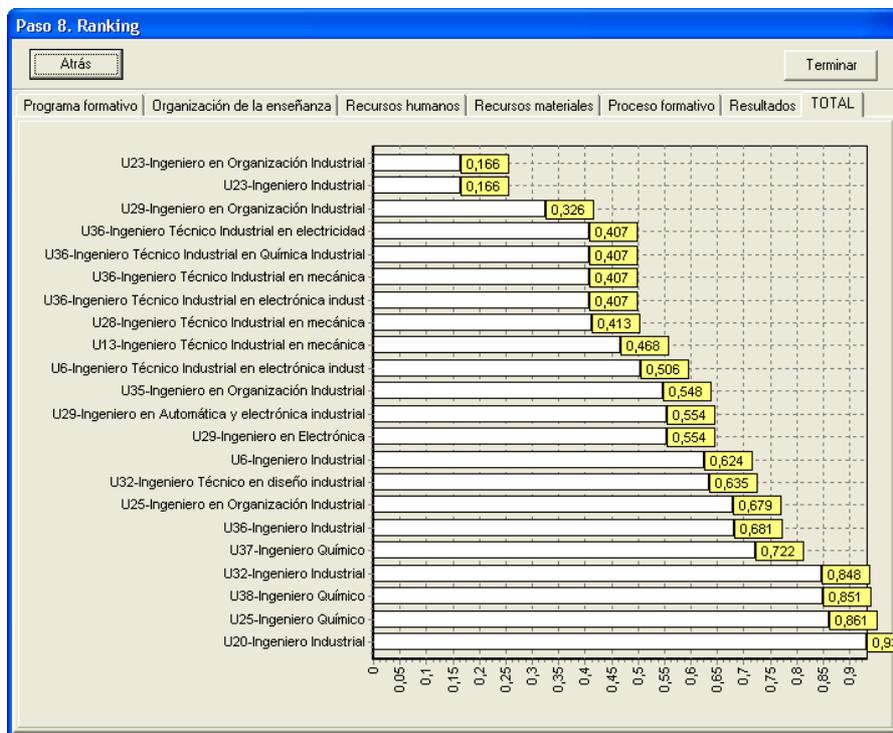


Figura III.48: Ranking para el Total correspondiente al algoritmo TOPSIS clásico

### III.4.1.2. MÉTODO TOPSIS MODIFICADO

Veamos ahora el mismo caso utilizando el algoritmo del método TOPSIS modificado. Como ya se comentó este algoritmo es el correspondiente a la selección del procedimiento 3 y del modo absoluto en el paso 2 de normalización del algoritmo.

En este caso, a la hora de seleccionar el modo “absoluto” vamos a introducir cuatro alternativas ficticias, A: Excelente, B: Buena, C: Regular y D: Deficiente que se corresponderán con aquellas con las que se hicieron las valoraciones de todos los criterios del IEE. La inclusión de estas 4 alternativas ficticias se corresponderían con el caso en el que todos los criterios estarían valorados con la misma etiqueta semicuantitativas A, B, C o D respectivamente.

**Paso 2. Normalización**

Atrás Normalizar Guardar Terminar Seguir

Elegir el tipo de normalización:

N0: no normalizada

N1: Procedimiento 1

N2: Procedimiento 2

N3: Procedimiento 3

N4: Procedimiento 4

Absoluta

$$N1: z_{ij} / \sqrt{\sum_{j=1}^m (z_{ij})^2}, j=1..m, i=1..n$$

$$N2: z_{ij} / \sum_{j=1}^m z_{ij}$$

$$N3: z_{ij} / \text{Max}_i(z_{ij})$$

$$N4: (z_{ij} - \text{Min}_i(z_{ij})) / (\text{Max}_i(z_{ij}) - \text{Min}_i(z_{ij}))$$

Como Tabla Como texto

	1.inf	1.med	1.sup	2.inf	2.med	2.sup
U6-Ingeniero Industrial	0,073547	0,26724	0,52751	0,58108	0,75575	1,0332
U20-Ingeniero Industrial	0,58108	0,75575	1,0332	0,3509	0,51149	0,75136
U32-Ingeniero Industrial	0,58108	0,75575	1,0332	0,3509	0,51149	0,75136
U23-Ingeniero Industrial	0,073547	0,26724	0,52751	0,073547	0,26724	0,52751
U29-Ingeniero en Organización Industrial	0,073547	0,26724	0,52751	0,3509	0,51149	0,75136
U23-Ingeniero en Organización Industrial	0,073547	0,26724	0,52751	0,073547	0,26724	0,52751
U35-Ingeniero en Organización Industrial	0,3509	0,51149	0,75136	0,3509	0,51149	0,75136
U25-Ingeniero en Organización Industrial	0,58108	0,75575	1,0332	0,3509	0,51149	0,75136
U36-Ingeniero Industrial	0,58108	0,75575	1,0332	0,3509	0,51149	0,75136
U6-Ingeniero Técnico Industrial en electrónica indust	0,3509	0,51149	0,75136	0,3509	0,51149	0,75136
U13-Ingeniero Técnico Industrial en mecánica	0,58108	0,75575	1,0332	0,073547	0,26724	0,52751
U28-Ingeniero Técnico Industrial en mecánica	0,3509	0,51149	0,75136	0,3509	0,51149	0,75136
U25-Ingeniero Químico	0,3509	0,51149	0,75136	0,58108	0,75575	1,0332
U37-Ingeniero Químico	0,3509	0,51149	0,75136	0,073547	0,26724	0,52751
U29-Ingeniero en Electrónica	0,073547	0,26724	0,52751	0,58108	0,75575	1,0332
U29-Ingeniero en Automática y electrónica industrial	0,073547	0,26724	0,52751	0,58108	0,75575	1,0332
U38-Ingeniero Químico	0,58108	0,75575	1,0332	0,58108	0,75575	1,0332
U36-Ingeniero Técnico Industrial en electricidad	0,3509	0,51149	0,75136	0,58108	0,75575	1,0332
U36-Ingeniero Técnico Industrial en electrónica indust	0,3509	0,51149	0,75136	0,58108	0,75575	1,0332
U36-Ingeniero Técnico Industrial en mecánica	0,3509	0,51149	0,75136	0,58108	0,75575	1,0332
U36-Ingeniero Técnico Industrial en Química Industrial	0,3509	0,51149	0,75136	0,58108	0,75575	1,0332
U32-Ingeniero Técnico en diseño industrial	0,3509	0,51149	0,75136	0,3509	0,51149	0,75136
A: Excelente	0,81354	1	1,2292	0,81354	1	1,2292
B: Bueno	0,58108	0,75575	1,0332	0,58108	0,75575	1,0332
C: Regular	0,3509	0,51149	0,75136	0,3509	0,51149	0,75136
D: Deficiente	0,073547	0,26724	0,52751	0,073547	0,26724	0,52751

Figura III.49: Normalización correspondiente a TOPSIS modificado.

**Paso 3. Ponderación**

Atrás **Ponderar** Terminar Seguir

Como Tabla | Como Texto

	1.inf	1.med	1.sup	2.inf	2.med	2.sup
U6-Ingeniero Industrial	0.0024914	0.01406	0.042253	0.019684	0.039761	0.082756
U20-Ingeniero Industrial	0.019684	0.039761	0.082756	0.011887	0.026911	0.060182
U32-Ingeniero Industrial	0.019684	0.039761	0.082756	0.011887	0.026911	0.060182
U23-Ingeniero Industrial	0.0024914	0.01406	0.042253	0.0024914	0.01406	0.042253
U29-Ingeniero en Organización Industrial	0.0024914	0.01406	0.042253	0.011887	0.026911	0.060182
U23-Ingeniero en Organización Industrial	0.0024914	0.01406	0.042253	0.0024914	0.01406	0.042253
U35-Ingeniero en Organización Industrial	0.011887	0.026911	0.060182	0.011887	0.026911	0.060182
U25-Ingeniero en Organización Industrial	0.019684	0.039761	0.082756	0.011887	0.026911	0.060182
U36-Ingeniero Industrial	0.019684	0.039761	0.082756	0.011887	0.026911	0.060182
U6-Ingeniero Técnico Industrial en electrónica indust	0.011887	0.026911	0.060182	0.011887	0.026911	0.060182
U13-Ingeniero Técnico Industrial en mecánica	0.019684	0.039761	0.082756	0.0024914	0.01406	0.042253
U28-Ingeniero Técnico Industrial en mecánica	0.011887	0.026911	0.060182	0.011887	0.026911	0.060182
U25-Ingeniero Químico	0.011887	0.026911	0.060182	0.019684	0.039761	0.082756
U37-Ingeniero Químico	0.011887	0.026911	0.060182	0.0024914	0.01406	0.042253
U29-Ingeniero en Electrónica	0.0024914	0.01406	0.042253	0.019684	0.039761	0.082756
U29-Ingeniero en Automática y electrónica industrial	0.0024914	0.01406	0.042253	0.019684	0.039761	0.082756
U38-Ingeniero Químico	0.019684	0.039761	0.082756	0.019684	0.039761	0.082756
U36-Ingeniero Técnico Industrial en electricidad	0.011887	0.026911	0.060182	0.019684	0.039761	0.082756
U36-Ingeniero Técnico Industrial en electrónica indust	0.011887	0.026911	0.060182	0.019684	0.039761	0.082756
U36-Ingeniero Técnico Industrial en mecánica	0.011887	0.026911	0.060182	0.019684	0.039761	0.082756
U36-Ingeniero Técnico Industrial en Química Industrial	0.011887	0.026911	0.060182	0.019684	0.039761	0.082756
U32-Ingeniero Técnico en diseño industrial	0.011887	0.026911	0.060182	0.011887	0.026911	0.060182
A: Excelente	0.027558	0.052612	0.098455	0.027558	0.052612	0.098455
B: Bueno	0.019684	0.039761	0.082756	0.019684	0.039761	0.082756
C: Regular	0.011887	0.026911	0.060182	0.011887	0.026911	0.060182
D: Deficiente	0.0024914	0.01406	0.042253	0.0024914	0.01406	0.042253

Figura III.50: Ponderación correspondiente a TOPSIS modificado.

**Paso 4. Calcular A+ y A-**

Atrás **Calcular** Terminar Seguir

Como Tabla | Como Texto

	1.inf	1.med	1.sup	2.inf	2.med	2.sup
A+	0.027558	0.052612	0.098455	0.027558	0.052612	0.098455
A-	0.0024914	0.01406	0.042253	0.0024914	0.01406	0.042253

Figura III.51: Valores  $A^+$  y  $A^-$  para en el método TOPSIS modificado

**Paso 5. Calculo de las distancia positiva  $d^+$  y la distancia negativa  $d^-$**

Atrás **Calcular** Terminar Seguir

Tabla d- | Tabla d+ | Como Texto

	1.inf	1.med	1.sup	2.inf	2.med	2.sup
U6-Ingeniero Industrial	0.021688	0.032351	0.049472	0.019798	0.027393	0.036118
U20-Ingeniero Industrial	0.027619	0.041161	0.062477	0.030209	0.043737	0.067413
U32-Ingeniero Industrial	0.026416	0.039158	0.05983	0.040346	0.059313	0.089582
U23-Ingeniero Industrial	0.0058781	0.008021	0.011217	0	0	0
U29-Ingeniero en Organización Industrial	0.011224	0.016725	0.023358	0.017287	0.023372	0.032985
U23-Ingeniero en Organización Industrial	0.0058781	0.008021	0.011217	0	0	0
U35-Ingeniero en Organización Industrial	0.015873	0.021423	0.029905	0.016713	0.022633	0.032008
U25-Ingeniero en Organización Industrial	0.023999	0.035269	0.053215	0.020247	0.028008	0.040926
U36-Ingeniero Industrial	0.02433	0.035722	0.055236	0.029441	0.042554	0.065445
U6-Ingeniero Técnico Industrial en electrónica indust	0.018744	0.026764	0.038077	0.02092	0.029197	0.041406
U13-Ingeniero Técnico Industrial en mecánica	0.021832	0.032629	0.049362	0.017194	0.023372	0.032254
U28-Ingeniero Técnico Industrial en mecánica	0.015112	0.020659	0.028838	0.017287	0.023372	0.032989
U25-Ingeniero Químico	0.027619	0.041161	0.062477	0.041798	0.062143	0.088908
U37-Ingeniero Químico	0.016706	0.024152	0.036709	0.041565	0.061868	0.088449
U29-Ingeniero en Electrónica	0.02126	0.031628	0.049552	0.020449	0.028608	0.040629
U29-Ingeniero en Automática y electrónica industrial	0.02126	0.031628	0.049552	0.020449	0.028608	0.040629
U38-Ingeniero Químico	0.03075	0.045101	0.071936	0.029441	0.042554	0.065445
U36-Ingeniero Técnico Industrial en electricidad	0.022216	0.032417	0.049717	0.016508	0.021868	0.029841
U36-Ingeniero Técnico Industrial en electrónica indust	0.022216	0.032417	0.049717	0.016508	0.021868	0.029841
U36-Ingeniero Técnico Industrial en mecánica	0.022216	0.032417	0.049717	0.016508	0.021868	0.029841
U36-Ingeniero Técnico Industrial en Química Industrial	0.022216	0.032417	0.049717	0.016508	0.021868	0.029841
U32-Ingeniero Técnico en diseño industrial	0.018711	0.026764	0.040076	0.030344	0.044124	0.067233
A: Excelente	0.043262	0.065484	0.098398	0.044045	0.065605	0.093543
B: Bueno	0.029672	0.044322	0.069902	0.030209	0.043737	0.067413
C: Regular	0.016215	0.022151	0.030943	0.016508	0.021868	0.029841
D: Deficiente	0	0	0	0	0	0

Figura III.52: Valores  $d^+$  y  $d^-$  en el método TOPSIS modificado

Paso 6. Calculo de R

Atrás  Terminar Seguir

Como Tabla Como Texto

	1.inf	1.med	1.sup	2.inf	2.med	2.sup
U6-Ingeniero Industrial	0.18172	0.40143	0.93394	0.19895	0.39389	0.82277
U20-Ingeniero Industrial	0.25515	0.56325	1.3262	0.32294	0.66667	1.5305
U32-Ingeniero Industrial	0.24864	0.54709	1.2946	0.36454	0.77395	1.665
U23-Ingeniero Industrial	0.056123	0.11134	0.23679	0	0	0
U29-Ingeniero en Organización Industrial	0.118	0.23437	0.49752	0.17743	0.34432	0.72326
U23-Ingeniero en Organización Industrial	0.056123	0.11134	0.23679	0	0	0
U35-Ingeniero en Organización Industrial	0.15924	0.31727	0.67865	0.16882	0.32795	0.68846
U25-Ingeniero en Organización Industrial	0.22497	0.49066	1.1479	0.20522	0.41132	0.89933
U36-Ingeniero Industrial	0.23277	0.50983	1.2191	0.30716	0.63853	1.465
U6-Ingeniero Técnico Industrial en electrónica indust	0.17942	0.37459	0.8227	0.20757	0.41638	0.88706
U13-Ingeniero Técnico Industrial en mecánica	0.18307	0.40506	0.94782	0.17649	0.34432	0.72896
U28-Ingeniero Técnico Industrial en mecánica	0.15152	0.30171	0.64372	0.17743	0.34432	0.72326
U25-Ingeniero Químico	0.25515	0.56325	1.3262	0.36981	0.82653	1.7747
U37-Ingeniero Químico	0.14912	0.31888	0.74024	0.36323	0.77034	1.6405
U29-Ingeniero en Electrónica	0.18097	0.40098	0.96095	0.19897	0.39978	0.85001
U29-Ingeniero en Automática y electrónica industrial	0.18097	0.40098	0.96095	0.19897	0.39978	0.85001
U38-Ingeniero Químico	0.31318	0.68273	1.6405	0.30716	0.63853	1.465
U36-Ingeniero Técnico Industrial en electricidad	0.20836	0.45291	1.0705	0.17648	0.33333	0.67752
U36-Ingeniero Técnico Industrial en electrónica indust	0.20836	0.45291	1.0705	0.17648	0.33333	0.67752
U36-Ingeniero Técnico Industrial en mecánica	0.20836	0.45291	1.0705	0.17648	0.33333	0.67752
U36-Ingeniero Técnico Industrial en Química Industrial	0.20836	0.45291	1.0705	0.17648	0.33333	0.67752
U32-Ingeniero Técnico en diseño industrial	0.17696	0.37459	0.86142	0.29739	0.62243	1.4081
A: Excelente	0.44601	1	2.2421	0.47065	1	2.1236
B: Bueno	0.3059	0.66667	1.6158	0.32294	0.66667	1.5305
C: Regular	0.16717	0.33333	0.71525	0.17648	0.33333	0.67752
D: Deficiente	0	0	0	0	0	0

Figura III.53: Valores de R en el método TOPSIS modificado

Paso 7. Defuzzificación

Atrás   $\beta$  0.33333 Terminar Seguir  $\lambda$  0.50000

Como Tabla Como Texto

	1	2	3	4	5	6	7
U6-Ingeniero Industrial	0.45455	0.43293	0.87206	0.69922	0.38251	0.7954	0.63394
U20-Ingeniero Industrial	0.63905	0.75336	0.87206	0.9436	0.90035	1.0539	0.82374
U32-Ingeniero Industrial	0.62193	0.85422	0.87206	0.58536	0.77295	0.79883	0.77945
U23-Ingeniero Industrial	0.12305	0	0.41979	0.51413	0.22887	0.20787	0.27272
U29-Ingeniero en Organización Industrial	0.25883	0.37965	0.55272	0.53853	0.16233	0.21471	0.39932
U23-Ingeniero en Organización Industrial	0.12305	0	0.41979	0.51413	0.22887	0.20787	0.27272
U35-Ingeniero en Organización Industrial	0.35116	0.36152	0.41979	0.74977	0.68512	0.8259	0.50618
U25-Ingeniero en Organización Industrial	0.55593	0.45841	0.76602	1.0223	0.64608	0.74803	0.85776
U36-Ingeniero Industrial	0.58108	0.72105	0.71905	0.37511	0.60462	0.64701	0.65376
U6-Ingeniero Técnico Industrial en electrónica indust	0.41675	0.46003	0.58967	0.79468	0.50844	0.56016	0.52814
U13-Ingeniero Técnico Industrial en mecánica	0.46882	0.36045	0.55272	0.92578	0.68637	0.28403	0.4668
U29-Ingeniero Técnico Industrial en mecánica	0.33368	0.37966	0.41979	0.86171	0.47264	0.48578	0.43803
U25-Ingeniero Químico	0.63905	0.31172	0.87206	0.6372	0.83156	0.79883	0.79928
U37-Ingeniero Químico	0.36081	0.84752	0.76602	0.57885	0.69901	0.78767	0.67524
U29-Ingeniero en Electrónica	0.45764	0.44135	0.87206	0.87284	0.57538	0.39706	0.59829
U29-Ingeniero en Automática y electrónica industrial	0.45764	0.44135	0.87206	0.87284	0.57538	0.39706	0.59829
U38-Ingeniero Químico	0.78078	0.72105	0.89761	1.0223	0.67659	0.7778	0.80575
U36-Ingeniero Técnico Industrial en electricidad	0.51508	0.36455	0.55272	0.41789	0.31109	0.198	0.44138
U36-Ingeniero Técnico Industrial en electrónica indust	0.51508	0.36455	0.55272	0.41789	0.31109	0.198	0.44138
U36-Ingeniero Técnico Industrial en mecánica	0.51508	0.36455	0.55272	0.41789	0.31109	0.198	0.44138
U36-Ingeniero Técnico Industrial en Química Industrial	0.51508	0.36455	0.55272	0.41789	0.31109	0.198	0.44138
U32-Ingeniero Técnico en diseño industrial	0.42279	0.6992	0.58967	0.69255	0.76236	0.73054	0.61582
A: Excelente	1.1147	1.0991	1.1165	1.1237	1.1281	1.2062	1.1265
B: Bueno	0.76473	0.75336	0.76602	0.77857	0.7745	0.83125	0.77335
C: Regular	0.36829	0.36455	0.36983	0.37511	0.37339	0.39755	0.37291
D: Deficiente	0	0	0	0	0	0	0

Figura III.54: Resultados defuzzificados correspondiente al algoritmo TOPSIS modificado.

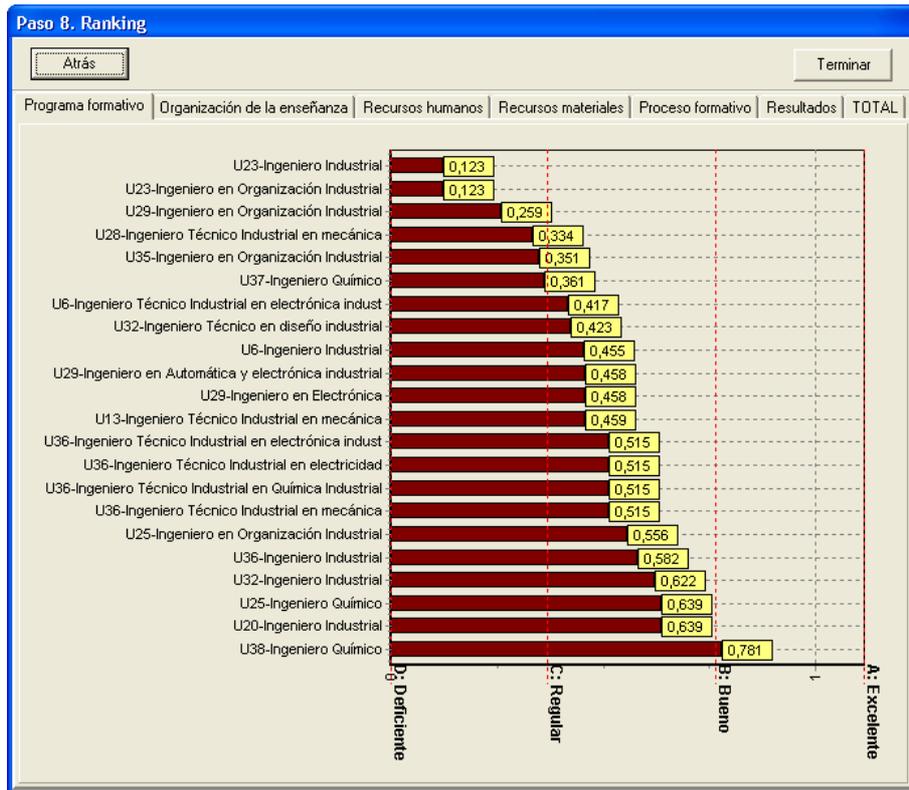


Figura III.55: Ranking para el criterio 1 Programa Formativo correspondiente al algoritmo TOPSIS modificado

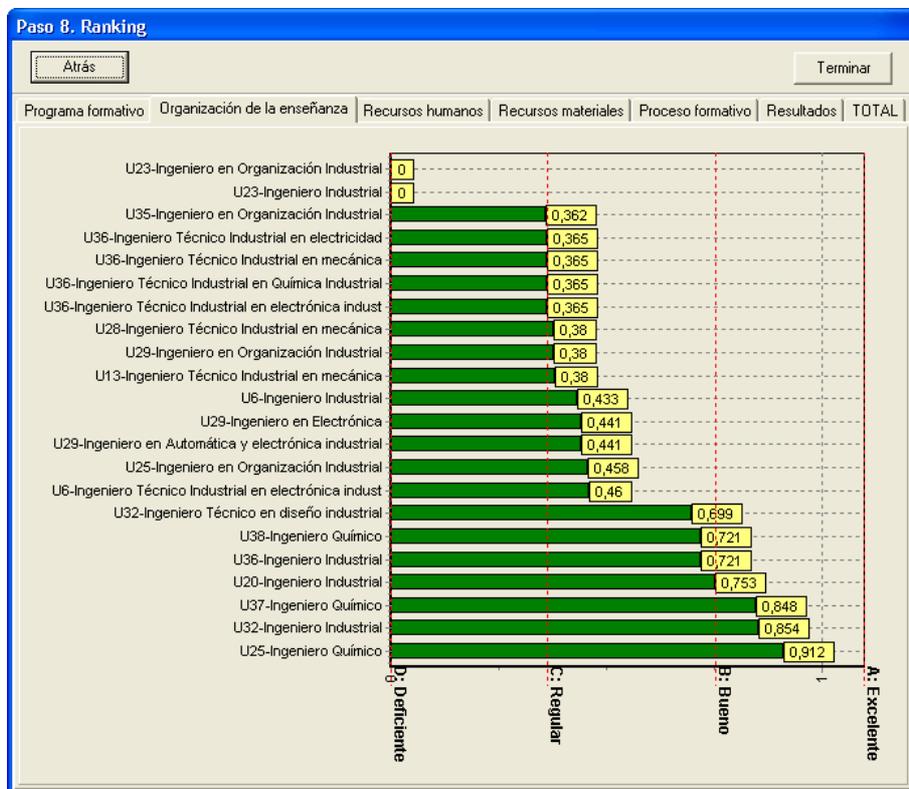


Figura III.56: Ranking para el criterio 2. Organización de la enseñanza correspondiente al algoritmo TOPSIS modificado

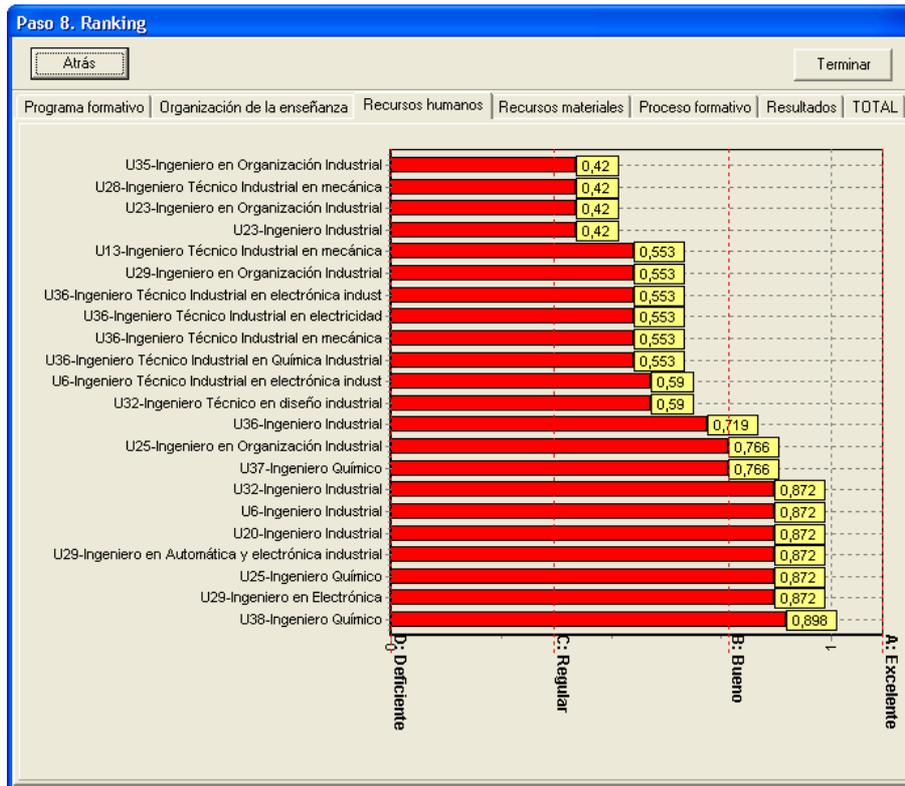


Figura III.57: Ranking para el criterio 3 Recursos Humanos correspondiente al algoritmo TOPSIS modificado

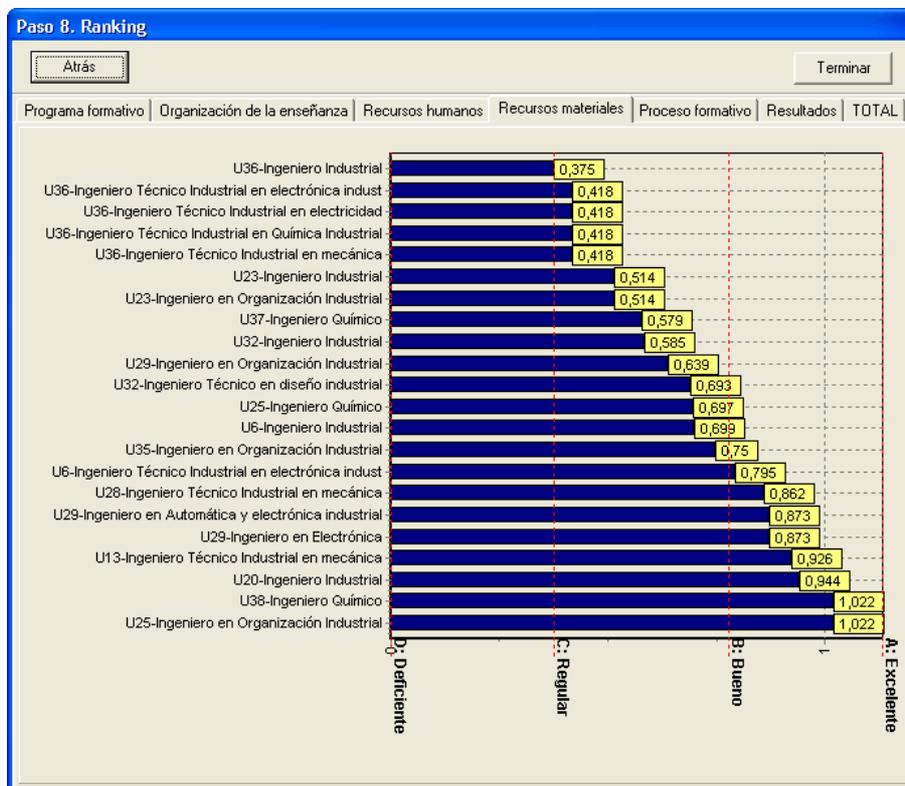


Figura III.58: Ranking para el criterio 4 Recursos materiales correspondiente al algoritmo TOPSIS modificado

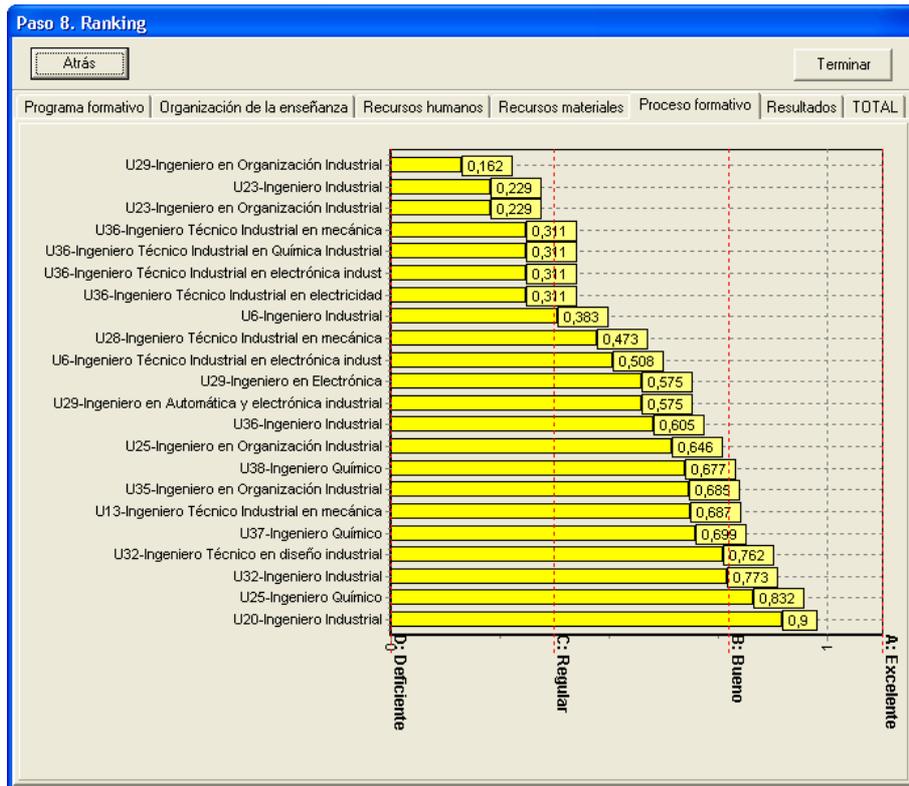


Figura III.59: Ranking para el criterio 5 Proceso Formativo correspondiente al algoritmo TOPSIS modificado

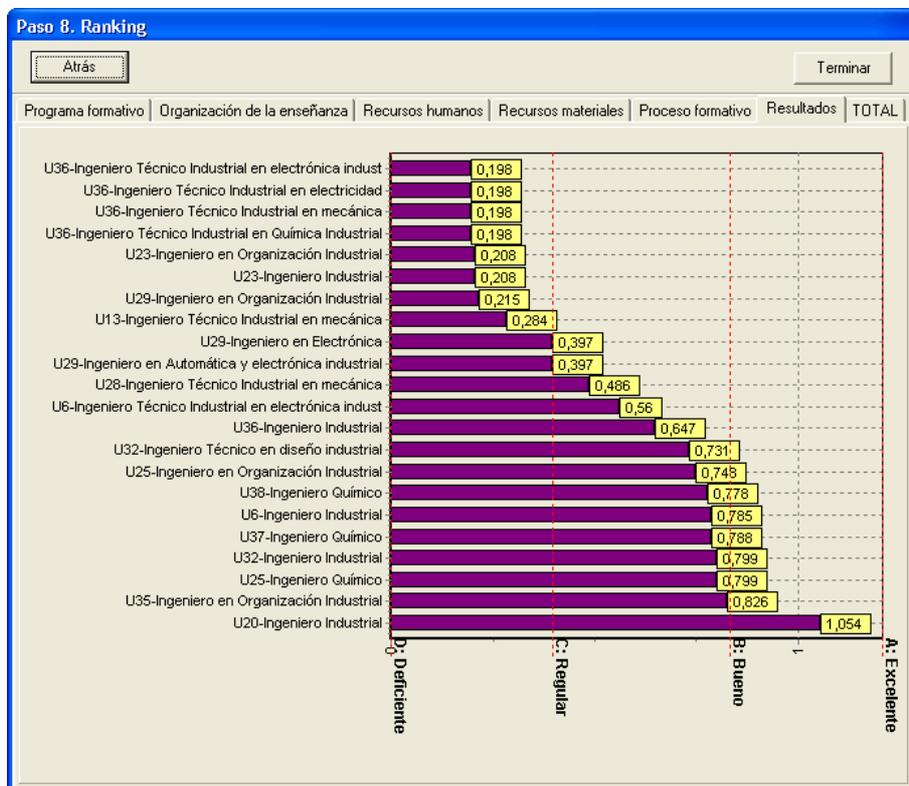


Figura III.60: Ranking para el criterio 6 Resultados correspondiente al algoritmo TOPSIS modificado

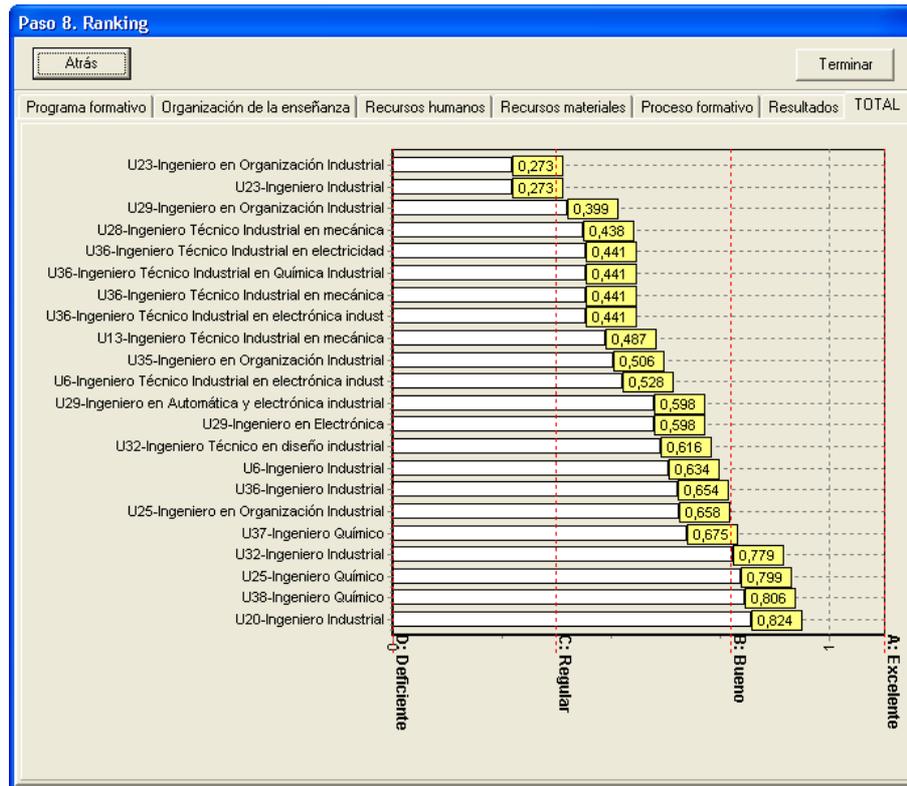


Figura III.61: Ranking para el Total correspondiente al algoritmo TOPSIS modificado

Como se puede comprobar en la salida gráfica de resultados en el caso de utilizar el método TOPSIS modificado tenemos las referencias de donde se encontrarían los valores de A: Excelente, B: Bueno, C: Regular y D: Deficiente con los que se evaluó cada una de las universidades para la titulación correspondiente, con lo que podemos tener una salida de datos en los mismos términos que tuvimos la entrada de los datos [134]. De este modo podemos saber en que intervalo se encuentra cada universidad-titulación (Deficiente-Regular; Regular-Bueno; Bueno-Excelente) para cada uno de los criterios y para el total. Ver tabla III.11 Resumen de los resultados.

Si tenemos en cuenta el peso de los criterios (Ver tablas III.8, Tabla III.9, y Tabla III.10), donde concluíamos que el criterio que mayor peso le daban los expertos en todos los casos era el criterio correspondiente al “Programa Formativo”, y segundo criterio mejor valorado era el criterio de los “Resultados”, para el caso de los expertos en el campo científico de las Enseñanzas Técnicas y el criterio de los “Recursos Humanos” en el caso de la totalidad de los expertos.

Y a la vista de los resultados podemos ver en el caso del criterio del “Programa Formativo” únicamente una universidad-titulación se encuentra en el rango Bueno-Excelente (U38-Ingeniero Químico), lo mismo ocurre en el caso del criterio de los “Resultados” (U20-Ingeniero Industrial), mientras que en el caso del criterio de los “Recursos Humanos” ya nos encontramos con 7 universidades-titulaciones en el rango Bueno-Excelente (U32-Ingeniero Industrial, U6-Ingeniero Industrial, U20-Ingeniero Industrial, U29-Ingeniero en Electrónica y

Automática Industrial, U25-Ingeniero Químico, U29- Ingeniero en Electrónica y U38-Ingeniero Químico). Si vemos que únicas 3 universidades-titulaciones se encuentran en el rango Bueno-Excelente en la valoración final nos encontramos con que estas son: U25-Ingeniero Químico, U38-Ingeniero Químico y U20-Ingeniero Industrial, las cuales han tenido la valoración de Bueno-Excelente en al menos 2 de los 3 criterios a los que se les ha asignado mayor peso. Lo cual nos hace pensar que a nivel general y a modo de recomendación, aquellas universidades-titulaciones que mejoren sus valoraciones en estos tres criterios (Programa Formativo, Resultados y Recursos Humanos) mejorarán su ranking en la valoración global.

Tabla III.11: Resumen de los resultados

<b>Criterios</b>	<b>Rango</b>	<b>Número Universidades-Titulación</b>
1. Programa Formativo	Deficiente-Regular	6
	Regular-Bueno	15
	Bueno-Excelente	1
2. Organización de la Enseñanza	Deficiente-Regular	7
	Regular-Bueno	12
	Bueno-Excelente	3
3. Recursos Humanos	Deficiente-Regular	0
	Regular-Bueno	15
	Bueno-Excelente	7
4. Recursos Materiales	Deficiente-Regular	1
	Regular-Bueno	13
	Bueno-Excelente	8
5. Proceso Formativo	Deficiente-Regular	8
	Regular-Bueno	12
	Bueno-Excelente	2
6. Resultados	Deficiente-Regular	10
	Regular-Bueno	11
	Bueno-Excelente	1
Total	Deficiente-Regular	2
	Regular-Bueno	17
	Bueno-Excelente	3

***BLOQUE IV.***  
***CONCLUSIONES Y TRABAJOS***  
***FUTUROS***



## **CAPÍTULO IV.1**

# **CONCLUSIONES**

---

### **IV.1.1. INTRODUCCIÓN**

Durante el transcurso de esta tesis se ha desarrollado un nuevo instrumento de toma de decisiones orientado al ranking de alternativas en el campo de la “Soft Computing” y en concreto en el desarrollo de una herramienta, SADRU-II para el ranking de universidades en el ámbito de la ingeniería industrial. Dicha aportación combina elementos conceptuales de la teoría general de la toma de decisión con estructuraciones y herramientas que le intentan aportar rigor teórico y potencialidad de aplicación práctica. El fondo filosófico de la propuesta se ha justificado con base en el paradigma integrador, el cual parte del reconocimiento y crítica parcial de toda aproximación metodológica en orden a aplicarla de forma aislada o en combinación con otras en función de las características específicas del problema o caso considerado.

En este contexto, el objeto de este último bloque es sintetizar las conclusiones de la presente investigación. En primer lugar, se recogerán las conclusiones correspondientes al estado del arte que se corresponde con el Bloque I, seguidamente las conclusiones referentes a las aportaciones metodológicas de la tesis, vinculada con el Bloque II y finalmente se enunciarán las conclusiones específicas de la aplicación relacionada con el Bloque III.

### **IV.1.2. CONCLUSIONES CORRESPONDIENTES AL ESTADO DEL ARTE**

En virtud al estado del arte estudiado en el Bloque I de introducción podemos concluir lo siguiente:

En relación a la toma de decisión:

- En muchas situaciones, los seres humanos han de tomar decisiones. Las personas que tienen que asumir la responsabilidad de tomar decisiones difíciles cuyas consecuencias influirán en el proyecto o en la organización a la que pertenecen o dirigen, están sometidas a tensiones profesionales y emocionales. Estas decisiones difíciles se caracterizan por observar intereses contrapuestos, tener elementos de incertidumbre, envolver

distintas personas en la decisión o bien poseer elementos difícilmente valorables.

- El Análisis de Decisión Multicriterio se presenta como una valiosa herramienta para ayudar al decisor durante este proceso de toma de decisión. Los métodos clásicos, permiten abordar, de forma sistemática y ordenada los problemas de decisión.
- La toma de decisión multicriterio, como tal, ha sido materia de investigación desde los últimos 40 años y ha tenido un importante desarrollo en las dos últimas décadas.
- Los métodos de decisión multicriterio son poderosas herramientas que ayudan a generar consenso en contextos complejos de decisión. Se pueden aplicar estas técnicas a casos en los que sea necesaria la confluencia de intereses y puntos de vista de diferentes grupos o personas. Esto permite que todas las partes interesadas participen en el proceso de toma de decisión.
- La mayoría de los métodos clásicos pertenecen a dos escuelas principales con dos visiones diferentes, pero estas metodologías resultan ineficientes para problemas de decisión complejos.

En relación a los Sistemas de Ayuda a la Decisión (SAD)

- Los SAD están especialmente indicados para resolver varias veces el mismo problema complejo.
- Los SAD que surgieron a comienzo de la década de los 70, son soluciones informáticas que pueden usarse para ayudar en la toma compleja de decisiones y la resolución de problemas de forma estructurada.
- El énfasis en el uso de los SAD hay que hacerlo en el hecho de que faciliten la ayuda a los decisores en términos de aumentar la efectividad del esfuerzo a decidir.
- Hay muchísimas áreas de aplicación en las que el uso de SAD es potencialmente prometedor, incluyendo la planificación y gestión (como puede ser en proyectos de ingeniería), gestión operativa y esencialmente en cualquier área en la que la gestión tenga que admitir situaciones de decisión con una estructura inicial poco familiar.

#### **IV.1.3. CONCLUSIONES CORRESPONDIENTES A LAS APORTACIONES METODOLÓGICAS.**

En virtud a las aportaciones metodológicas de la tesis en el Bloque II. Metodología podemos concluir lo siguiente:

En relación a la Soft Computing y el Modelado Lingüístico Difuso:

- La necesidad de encontrar la solución óptima de un problema correctamente planteado, o la mejor solución entre las disponibles,

justifica que se construyan y estudien teorías, y se propagan metodologías en el campo científico en el que surge la cuestión que se ha de resolver.

- La facilidad de resolver problemas reales de dimensión cada vez mayor, gracias a la mayor potencia y el menor coste de los computadores, la imposibilidad de conocer en todos los casos las soluciones exactas que les corresponde a esos problemas, y la necesidad de dar respuestas a las situaciones prácticas contempladas en multitud de casos, han motivado que los algoritmos sean empleados cada vez más como valiosas herramientas capaces de proporcionar soluciones donde los algoritmos exactos no son capaces de encontrarlas.
- Desde que Lofti Zadeh introdujera el concepto de conjunto difuso, las aplicaciones y desarrollos basados en este concepto han evolucionada de tal modo que, hoy en día, es prácticamente imposible calcular el volumen de negocio que generan en todo el mundo.
- La teoría de los conjuntos difusos engloba un corpus bien organizado de nociones básicas incluyendo operaciones de agregación, una teoría generalizada de las relaciones, medidas específicas de cantidad de la información y un sistema de cálculo para los números difusos. Tras el concepto de lógica difusa se encuentra la teoría de la posibilidad y los sistemas basados en reglas difusas, que constituyen una herramienta poderosa y versátil tanto para el modelado verbal como el numérico.
- Cuando los datos difusos se incorporan dentro de un modelo de decisión multicriterio, la evaluación final no son valores crisp, sino que son valores difusos. Estos valores difusos no siempre proporcionan un conjunto completamente ordenado como lo hacen los números reales.
- Todos los métodos de ordenación de números difusos tienen algún problema o desventaja, como dificultad de interpretación o inconsistencia con la intuición humana, o de posibilidad de ordenación de  $n$  números difusos al mismo tiempo.
- La aproximación perfilada en esta tesis doctoral, presenta todas las ventajas del método de Liou y Wang (uno de los más utilizados en la práctica), mejorando el método en algunos casos donde este no es suficientemente discriminatorio, asimismo el procedimiento propuesto produce resultados satisfactorios no solo en problemas bien definidos, sino también da soluciones donde este método no podría discriminar. Además de que otros índices estudiados, así como la solución crisp son valores particulares del método propuesto. Incluyendo asimismo este método la posibilidad de ordenación de  $n$  números difusos al mismo tiempo.
- Los problemas presentes en el mundo real presentan aspectos que pueden ser de distinta naturaleza. Cuando dichos aspectos o fenómenos son de naturaleza cuantitativa, éstos se valoran fácilmente utilizando valores numéricos más o menos precisos. Sin embargo, cuando se trabaja con información vaga e imprecisa o cuando la naturaleza de tales aspectos no es cuantitativa sino cualitativa, no es sencillo ni adecuado utilizar un

modelado de preferencias numérico. En este caso, es más aconsejable utilizar otro tipo de modelado como, por ejemplo, el lingüístico.

- El modelado lingüístico difuso que tiene como base teórica la Teoría de Conjuntos difusos, se ha mostrado como una técnica eficaz para valorar aspectos de naturaleza cualitativa. Para representar los aspectos cualitativos como valores lingüísticos, utiliza *variables lingüísticas* cuyo dominio de expresión son conjunto de palabras o términos lingüísticos.
- Al ser las palabras menos precisas que los números, el concepto de variable lingüística es una buena propuesta para caracterizar aquellos fenómenos que no son adecuados para poder ser evaluados mediante valores numéricos.

En relación a la Valoración de Alternativas:

- Los métodos clásicos resultan ineficientes para problemas de decisión complejos, sobre todo en aquellos casos donde nos encontramos con criterios de los que solo disponemos información cualitativa. Por ello resulta más interesante la utilización de métodos híbridos donde se combinen las ventajas que puedan aportar cada uno de estos métodos clásicos.
- El método AHP difuso es una extensión de la metodología AHP, ampliamente aceptada por la comunidad científica, mediante la combinación de la teoría de conjuntos difusos, teniendo en cuenta las operaciones matemáticas que se derivan de esta teoría. Utilizamos esta extensión de la metodología AHP para la determinación del peso de los criterios en el problema de evaluación de alternativas.
- Para la etapa de evaluación de alternativas en el problema de decisión proponemos el empleo del Método TOPSIS difuso al que le hemos hecho aportaciones que solventan algunas de las problemáticas que este plantea, como es el efecto de la normalización de la matriz en el método, y el problema de inversión de orden.
- De este modo planteamos un Método TOPSIS difuso modificado donde se incluyen modificaciones en la normalización empleada, así como en el concepto de modo de operación que aborda el método.

### **VI.1.3. CONCLUSIONES CORRESPONDIENTES A LA APLICACIÓN DE LA TESIS**

En relación a la aplicación de la tesis, Sistema de Ayuda a la Decisión para el Ranking de Universidades en el ámbito de la Ingeniería Industrial en el Bloque III podemos concluir lo siguiente:

En relación al planteamiento del problema:

- Proponemos un Sistema de Ayuda a la Decisión (S.A.D.) para la evaluación de las titulaciones en el ámbito de la Ingeniería Industrial dentro del sistema universitario español, basado en el Libro Blanco de

Titulaciones de Grado de Ingeniería de la Rama Industrial (Propuesta de las Escuelas Técnicas Superiores de Ingenieros Industriales)

- Este S.A.D está basado en el Programa de Evaluación Institucional (P.E.I.) y en la fase de Evaluación Externa y más concretamente en el Informe de Evaluación Externa IEE de la ANECA, informe que ha sido elaborado por un Comité de Evaluación Externa (CEE).
- La estructura del SAD es un sistema compuesto por una base de datos en Microsoft Access donde se implementa la entrada de datos al sistema y una base de Modelos en Delphi, donde se implementa los distintos algoritmos y la salida de resultados.

En relación con la base de datos:

- Se ha implementado una base de datos con dos entrada de datos, por un lado la correspondiente a los distintos informes IEE de la ANECA y por el otro, los datos correspondientes a los expertos mediante una encuesta en Excel que se les envió a los expertos para la extracción del conocimiento. Esta encuesta se refiriere, por un lado a la ponderación de los criterios/subcriterios de evaluación de los informes IEE, y por otro, a la definición de las etiquetas semicuantitativas utilizadas asimismo en los informes IEE.
- El cuestionario diseñado para la extracción del conocimiento referente al peso de los criterios/subcriterios se realizó en base a la metodología AHP, en el que se optimizó el número de preguntas en aras de que este cuestionario fuera acotado y asumible por los expertos que lo fueran a realizar.

En relación con la Agregación de Información:

- Una vez obtenida toda la información por parte de los expertos se ha generado la información completa correspondiente para cada uno de ellos.
- De igual modo, a partir de la información de los expertos, se ha obtenido la definición de los conjuntos difusos para las etiquetas semicuantitativas que utiliza el informe IEE.
- Se han implementado tres tipos de ponderaciones para los criterios y subcriterios, en función del tipo de agregación utilizada y del momento en la realización de dicha agregación.
- Asimismo se ha diferenciado entre las ponderaciones consideradas para todos los expertos o solamente para aquellos expertos correspondientes al campo científico de las enseñanzas técnicas.

En relación al software SADRU-II

- Se ha implementado un software para el SAD, el cual ha sido programado en Delphi con la denominación “SAD para el Ranking de Universidades en el ámbito de la Ingeniería Industrial SADRU-II”.

- La implementación del software se ha presentado en “abierto” para poder tener información referente a los pasos intermedios del algoritmo desarrollado.
- El software se presenta como una aplicación ejecutable (SADRU-II.exe) que va enlazada con la base de datos desarrollada al efecto.
- El SADRU-II, parte de la relación de universidades-titulaciones implementadas en la base de datos, a partir de la cual se puede o bien realizar el estudio para toda ésta, o bien realizar una selección a gusto del usuario.
- En el paso de establecimiento de la matriz de decisión en SADRU-II, se puede realizar la selección entre el tipo de experto utilizado en la ponderación, el tipo de agregación utilizado igualmente en la ponderación y finalmente el coeficiente de desviación para la definición de las etiquetas semicuantitativas.
- En el paso del algoritmo del SADRU-II correspondiente a la normalización, se podrá seleccionar entre 5 procedimientos y dos modos de operación, centrándonos principalmente en el procedimiento 1 y modo relativo que se correspondería con el TOPSIS clásico y el procedimiento 3 y modo absoluto que se correspondería con el TOPSIS modificado.
- El software SADRU-II cuenta con una salida de datos, difusos, una salida de datos crisp (una vez defuzzificados estos) y una salida de datos gráfica.
- Se presenta el estudio de desarrollo del caso correspondiente a todas las universidades-titulaciones disponibles en la base de datos. Tanto para el caso del TOPSIS clásico, como el caso del TOPSIS modificado

## CAPÍTULO IV.2

### Trabajos futuros

---

#### VI.2.1. RECOMENDACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES

Por la relativa novedad de este tipo de investigación, así como por el carácter transversal de su alcance, frente al cierre de esta tesis doctoral se abren un considerable número de futuras líneas de investigación, igualmente agrupadas según el siguiente esquema:

- Respecto a las aportaciones metodológicas
- Respecto a las aplicación/es

#### VI.2.2. FUTURAS INVESTIGACIONES EN LAS APORTACIONES METODOLÓGICAS

A continuación se describen de forma sintética las posibles líneas futuras de investigación en función de las aportaciones metodológicas de la tesis.

En relación con la Soft Computing y el Modelado Lingüístico Difuso:

- Profundizar en el ámbito del modelado lingüístico difusos para la implementación en problemas de decisión multicriterio, donde la única información disponible es de tipo cualitativo.
- Profundizar en el campo de la ordenación de números difusos, analizando para cada problema de decisión en concreto, cuales son las metodologías a aplicar más adecuadas.
- Asimismo en el proceso de evaluación de las alternativas y aplicación de los algoritmos de decisión a utilizar, profundizar en los métodos de defuzzificación a emplear y el momento en el que estos se aplican.

En relación a la valoración de las alternativas

- Ver que otros métodos podrían ser de aplicación en la determinación del peso de los criterios, como podrían ser, el método del Proceso Analítico en Red (ANP), donde se incluye además el concepto de interrelación entre criterios.

- Dentro del método TOPSIS, profundizar en el estudio del paso correspondiente a la normalización de la matriz según los procedimientos planteados. Y analizar los más adecuados para la utilización de números difusos.
- Igualmente dentro del método TOPSIS, profundizar en el estudio del paso correspondiente al cálculo de las distancias al NIS y al PIS, implementando distintas metodologías.
- Profundizar en problemas de decisión donde la información disponible pueda ser tanto cualitativa como cuantitativa.
- Profundizar en los métodos de agregación de la información de los expertos así como en los momentos de realización de dicha agregación.

### **VI.2.3. FUTURAS INVESTIGACIONES EN LAS APLICACIONES**

A continuación se describen de forma sintética las posibles líneas futuras de investigación en función de las posibles aplicaciones de la tesis.

En relación a las posibles aplicaciones de la tesis:

- Estudiar posibles campos de aplicación de la metodología aportada en la tesis a nivel general, como podrían ser, selección de personal, selección de cartera de proyectos, selección de contratistas, selección de localización...
- Y dentro del campo de la calidad universitaria ver otras posibles aplicaciones de ranking, como podría ser: de universidades en general, de productividad científica en las universidades, de sitios web educacionales, de departamentos de una universidad, de selección de profesorado, de evaluación de proyectos de innovación educativa, etc...

En relación a la presente aplicación de la tesis:

- Desarrollar una versión “usuario” del software SADRU-II, para potenciales usuarios, ANECA, estudiantes, gobierno de las universidades, etc.
- Ampliar la base de datos disponible con todas las universidades-titulaciones evaluadas hasta la fecha.
- Ampliar la información correspondiente al número de expertos.
- Ampliar el software, no solo al ámbito de la ingeniería industrial sino a todo el ámbito de las titulaciones de ingeniería.
- Asimismo ver la posibilidad de desarrollar el software no solamente para el campo de las ingenierías sino también a todas las titulaciones universitarias, haciendo énfasis en la información correspondiente a los expertos de los distintos campos científicos.
- Desarrollar nuevos sistemas de extracción del conocimiento de los expertos a través de las encuestas utilizando sistemas web o similares.

- Y finalmente como posible trabajo futuro a desarrollar dentro de esta aplicación, sería la inclusión de un análisis de sensibilidad en el sistema, el cual se pueda ofrecer recomendaciones de mejora a las universidades. Por ejemplo, ver como afectaría a los resultados por criterios y totales, las modificaciones en las valoraciones de los criterios con mayor peso, y si esto hace subir de rango en el ranking.



# ***BIBLIOGRAFÍA***



## Bibliography

- [1] M. R. Abdi and A. W. Labib, "A design strategy for reconfigurable manufacturing systems (RMSs) using analytical hierarchical process (AHP): a case study," *International Journal of Production Research*, vol. 41, no. 10, pp. 2273-2299, July 2003.
- [2] M. A. Abo-Sinna and T. H. M. Abou-El-Enien, "An interactive algorithm for large scale multiple objective programming problems with fuzzy parameters through TOPSIS approach," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 177, no. 2, pp. 515-527, June 2006.
- [3] M. A. Abo-Sinna and A. H. Amer, "Extensions of TOPSIS for multi-objective large-scale nonlinear programming problems," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 162, no. 1, pp. 243-256, Mar. 2005.
- [4] Adamo J.M: "Fuzzy decision trees," *Fuzzy Sets and Systems*, pp. 207-219, 1980.
- [5] G. I. Adamopoulos and C. P. Pappis, "A fuzzy-linguistic approach to a multi-criteria sequencing problem," *European Journal of Operational Research*, vol. 92, no. 3, pp. 628-636, Aug. 1996.
- [6] J. Aguarón and J. Moreno-Jimenez, "The geometric consistency index: Approximated thresholds," *European Journal of Operational Research*, vol. 147, no. 1, pp. 137-145, 2003.
- [7] S. L. Ahire, "Selection of TQM pilot projects using an MCDM approach," *The International journal of quality & reliability management*, vol. 12, no. 1 1995.
- [8] M. M. Akarte, "Web based casting supplier evaluation using analytical hierarchy process," *The journal of the Operational Research Society*, vol. 52, no. 5, pp. 511-522, 2001.
- [9] A. Akgunduz, "Evaluation of sub-component alternatives in product design processes," *Robotics and computer-integrated manufacturing*, vol. 18, no. 1, pp. 69-81, 2002.
- [10] K. M. A. Al Harbi, "Application of the AHP in project management," *International Journal of Project Management*, vol. 19, no. 1, pp. 19-27, Jan. 2001.

- [11] A. S. Alidi, "Use of the analytic hierarchy process to measure the initial viability of industrial projects," *International Journal of Project Management*, vol. 14, no. 4, pp. 205-208, 1996.
- [12] A. a. Ami, "Preference simulation and preference programming: robustness issues in priority derivation," *European Journal of Operational Research*, vol. 69, no. 2, p. 200, 1993.
- [13] A. A. Andijani, "Manufacturing blocking discipline: A multi-criterion approach for buffer allocations," *International Journal of Production Economics*, vol. 51, no. 3, pp. 155-163, 1997.
- [14] A. A. Andijani, "A multi-criterion approach for Kanban allocations," *Omega*, vol. 26, no. 4, p. 483, 1998.
- [15] ANECA, "Agencia Nacional de Evaluación de la Calidad y Acreditación. Libro blanco de las Titulaciones de Grado de Ingeniería en la Rama Industrial (Propuesta de las Escuelas Técnicas Superiores de Ingenieros Industriales),"2007.
- [16] ANECA, "Agencia Nacional de Evaluación de la Calidad y Acreditación. Programa de Evaluación Institucional. Anualidad 2006/2007. Guía de Evaluación Externa 2007.,"2007.
- [17] ANECA, "Agencia Nacional de Evaluación de la Calidad y Acreditación,"2008.
- [18] D. I. Angelis and C. Y. Lee, "Strategic investment analysis using activity based costing concepts and analytical hierarchy process techniques," *International Journal of Production Research*, vol. 34, no. 5, p. 1331, May1996.
- [19] B. Arfi, "Fuzzy decision making in politics: A linguistic fuzzy-set approach (LFSA)," *Political Analysis*, vol. 13, no. 1, p. 23, 2005.
- [20] R. L. Armacost, "AHP framework for prioritizing customer requirements in QFD: An industrialized housing application," *IIE transactions*, vol. 26, no. 4, pp. 72-79, 1994.
- [21] D. Arnott, "A critical analysis of decision support systems research," *Journal of Information Technology*, vol. 20, no. 2, p. 67, 2005.
- [22] R. M. Avila Mogollon, "El proceso analítico jerárquico ahp y su aplicación en el uso de las tierras, caso Brasil.,"Report 2, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2000.
- [23] I. J. Azis, "Analytic Hierarchy Process in the benefit-cost framework. A post-evaluation of the Trans-Sumatra highway project," *European Journal of Operational Research*, vol. 48, no. 1, pp. 38-48, 1990.

- [24] S. M. Baas and Kwakernaak H., "Rating and ranking of multiple-aspect alternatives using fuzzy sets," *Automatica*, vol. 13, pp. 47-58, 1977.
- [25] Z. Babic and N. Plazibat, "Ranking of enterprises based on multicriterial analysis," *International Journal of Production Economics*, vol. 56-57, pp. 29-35, Sept.1998.
- [26] M. A. Badri, "Combining the analytic hierarchy process and goal programming for global facility location-allocation problem," *International Journal of Production Economics*, vol. 62, no. 3, pp. 237-248, Sept.1999.
- [27] F. J. Baldwin and Guild N.C.F., "Comparison of fuzzy sets on the same decision space," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 2, pp. 213-231, 1979.
- [28] C. Bana, C. A. Costa, and Vansnick J.C., "The MACBETH approach: Basic ideas, software and an application," in *Advances in Decision Analysis*. N. Meskens and M. Roubens, Eds. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999, pp. 131-157.
- [29] S. Barba-Romero and J. Pomerol, *Decisiones Multicriterio, Fundamentos Teóricos y Utilización Práctica* Servicio de Publicaciones de la Universidad de Alcalá, 1997.
- [30] S. Barba-Romero and J. Pomerol, *Multicriterion Decision in Management: Principles and Practice* Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [31] R. E. Bellman and L. A. Zadeh, "Decision-making in a fuzzy environment," *Management science*, vol. 17, pp. 141-164, 1970.
- [32] J. M. Benitez, J. C. Martin, and C. Roman, "Using fuzzy number for measuring quality of service in the hotel industry," *Tourism Management*, vol. 28, no. 2, pp. 544-555, Apr.2007.
- [33] M. Bertolini, M. Braglia, and G. Carmignani, "Application of the AHP methodology in making a proposal for a public work contract," *International Journal of Project Management*, vol. 24, no. 5, pp. 422-430, July2006.
- [34] M. Bertolini and M. Bevilacqua, "A combined goal programming--AHP approach to maintenance selection problem," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. In Press, Corrected Proof.
- [35] M. Beynon, "DS/AHP method: A mathematical analysis, including an understanding of uncertainty," *European Journal of Operational Research*, vol. 140, no. 1, pp. 148-164, 2002.
- [36] A. Bhattacharya, B. Sarkar, and S. K. Mukherjee, "Integrating AHP with QFD for robot selection under requirement perspective," *International*

- Journal of Production Research*, vol. 43, no. 17, pp. 3671-3685, Sept.2005.
- [37] U. S. Bititci, P. Suwignjo, and A. S. Carrie, "Strategy management through quantitative modelling of performance measurement systems," *International Journal of Production Economics*, vol. 69, no. 1, pp. 15-22, Jan.2001.
- [38] M. J. Bolaños, M. T. Lamata, and S. Moral, "Decision making problems in a general environment," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 25, no. 2, pp. 135-144, Feb.1988.
- [39] N. Bolloju, "Aggregation of analytic hierarchy process models based on similarities in decision makers' preferences," *European Journal of Operational Research*, vol. 128, no. 3, pp. 499-508, Feb.2001.
- [40] P. P. Bonissone, "Selecting uncertainty calculi and granularity: an experiment in trading-off precision and complexity," in *Uncertainty in Artificial Intelligence*, 4 ed. In:L.H.Kanal and J.F.Lemmer (Eds), Ed. Amsterdam: North-Holland, 1986, pp. 217-247.
- [41] P. P. Bonissone, "A fuzzy sets based linguistic approach: Theory and applications," in *Approximate Reasoning in Decision Analysis*. In: M.M.Gupta and E.Sanchez, Ed. North-Holland Publishing Company, 1982, pp. 329-339.
- [42] G. Bordogna, M. Fedrizzi, and G. Pasi, "A linguistic modelling of consensus in group decision making based on OWA operators," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. Part A: Systems Humans, 27, no. 1, pp. 126-133, 1997.
- [43] G. Bordogna and G. Pasi, "A fuzzy linguistic approach generalizing boolean information retrieval: a model and its evaluation," *Journal of the American Society for Information Science*, vol. 44, no. 2, pp. 70-82, 1993.
- [44] Bortolan G. and Degani R., "A review of some methods for ranking subsets," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 15, pp. 1-19, 1985.
- [45] E. Bottani and A. Rizzi, "A fuzzy TOPSIS methodology to support outsourcing of logistics services," *Supply Chain Management*, vol. 11, no. 4, pp. 294-308, 2006.
- [46] F. T. Bozbura, A. Beskese, and C. Kahraman, "Prioritization of human capital measurement indicators using fuzzy AHP," *Expert Systems with Applications*, vol. In Press, Corrected Proof.
- [47] C. E. Bozdog, C. Kahraman, and D. Ruan, "Fuzzy group decision making for selection among computer integrated manufacturing systems," *Computers in Industry*, vol. 51, no. 1, pp. 13-29, May2003.

- [48] M. Braglia, "MAFMA: Multi-attribute failure mode analysis," *International Journal on Quality and Reliability management*, vol. 17, no. 9, pp. 1017-1033, 2000.
- [49] M. Braglia, M. Frosolini, and R. Montanari, "Fuzzy TOPSIS approach for failure mode, effects and criticality analysis," *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 19, pp. 425-443, 2003.
- [50] M. Braglia, R. Gabrielli, and D. Miconi, "Material handling device selection in cellular manufacturing," *Journal of Multicriteria Decision Analysis*, vol. 10, no. 6, pp. 303-315, 2001.
- [51] J. P. Brans and B. Mareschal, "The PROMETHE methods for MCDM; The PROMCALC, GAIA and BANKADVISER software. Readings in MCDA,". Bana e Costa, Ed. Berlin: Springer-Verlang, 1990.
- [52] A. C. Brent, D. E. C. Rogers, T. S. M. Ramabitsa-Siimane, and M. B. Rohwer, "Application of the analytical hierarchy process to establish health care waste management systems that minimise infection risks in developing countries," *European Journal of Operational Research*, vol. In Press, Corrected Proof.
- [53] N. Bryson, "Action learning evaluation procedure for multiple criteria decision making problems," *European Journal of Operational Research*, vol. 96, no. 2, pp. 379-386, 1997.
- [54] N. Bryson, "Group decision-making and the analytic hierarchy process: exploring the consensus-relevant information content," *Computers & operations research*, vol. 23, no. 1 1996.
- [55] N. Bryson, "Generating consensus priority point vectors: A logarithmic goal programming approach," *Computers & operations research*, vol. 26, no. 6, pp. 637-643, 1999.
- [56] J. J. Buckley and S. Chanas, "A fast method of ranking alternatives using fuzzy numbers," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 30, pp. 337-339, 1989.
- [57] G. Buela-Casal and S. J. C. Q.-B. R. C. A. Bermudez Maria de la Paz, "Ranking de 2008 en productividad en investigación de las universidades públicas españolas," *Psicothema*, vol. 21, no. 2, pp. 309-317, 2009.
- [58] G. Büyüközkan, O. Feyzioglu, and E. Nebol, "Selection of the strategic alliance partner in logistics value chain," *International Journal of Production Economics*, vol. 113, no. 1, pp. 148-158, May2008.
- [59] D. H. Byun, "The AHP approach for selecting an automobile purchase model," *Information & Management*, vol. 38, no. 5, pp. 289-297, Apr.2001.

- [60] H. S. Byun and K. H. Lee, "A decision support system for the selection of a rapid prototyping process using the modified TOPSIS method," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 26, pp. 1338-1347, 2005.
- [61] E. Cables-Perez, M. S. Garcia-Cascales, and M. T. Lamata, "The use of different norms in the TOPSIS decision making method," *The 8th International FLINS conference on computational intelligence in decision and control. Madrid*, 2008.
- [62] E. Cagno, F. Caron, and A. Perego, "Multi-criteria assessment of the probability of winning in the competitive bidding process," *International Journal of Project Management*, vol. 19, no. 6, pp. 313-324, Aug.2001.
- [63] N. Caliskan, "A decision support approach for the evaluation of transport investment alternatives," *European Journal of Operational Research*, vol. 175, no. 3, pp. 1696-1704, Dec.2006.
- [64] L. Campos and Muñoz A., "A subjective approach for ranking fuzzy numbers," *Fuzzy Sets and Systems*, pp. 145-153, 1989.
- [65] M. C. Carnero, "Selection of diagnostic techniques and instrumentation in a predictive maintenance program. A case study," *Decision Support Systems*, vol. In Press, Corrected Proof.
- [66] F. Cebi and Bayraktar.D, "An integrated approach for supplier selection," *Logistics Information Management*, vol. 16, no. 6, pp. 395-400, 2003.
- [67] R. Ceha and H. Ohta, "The evaluation of air transportation network based on multiple criteria," *Computers & industrial engineering*, vol. 27, no. 1-4, pp. 249-252, Sept.1994.
- [68] M. Celik, I. ha Er, and A. F. Ozok, "Application of fuzzy extended AHP methodology on shipping registry selection: The case of Turkish maritime industry," *Expert Systems with Applications*, vol. 36, no. 1, pp. 190-198, Jan.2009.
- [69] F. T. S. Chan and S. H. Chung, "Multi-criteria genetic optimization for distribution network problems," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 24, no. 7-8, pp. 517-532, 2004.
- [70] F. T. S. Chan, S. H. Chung, and K. L. Choy, "Optimization of order fulfillment in distribution network problems," *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 17, no. 3, pp. 307-319, 2006.
- [71] F. T. S. Chan, K. C. Au, and P. L. Y. Chan, "A decision support system for production scheduling in an ion plating cell," *Expert Systems with Applications*, vol. 30, no. 4, pp. 727-738, May2006.

- [72] F. T. S. Chan and S. H. Chung, "A multi-criterion genetic algorithm for order distribution in a demand driven supply chain," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 17, no. 4, pp. 339-351, June2004.
- [73] F. T. S. Chan and S. H. Chung, "Multicriterion genetic optimization for due date assigned distribution network problems," *Decision Support Systems*, vol. 39, no. 4, pp. 661-675, June2005.
- [74] F. T. S. Chan, S. H. Chung, and S. Wadhwa, "A heuristic methodology for order distribution in a demand driven collaborative supply chain," *International Journal of Production Research*, vol. 42, no. 1, pp. 1-19, Jan.2004.
- [75] F. T. S. Chan, S. H. Chung, and S. Wadhwa, "A hybrid genetic algorithm for production and distribution," *Omega*, vol. 33, no. 4, pp. 345-355, Aug.2005.
- [76] F. T. S. Chan, B. Jiang, and N. K. H. Tang, "The development of intelligent decision support tools to aid the design of flexible manufacturing systems," *International Journal of Production Economics*, vol. 65, no. 1, pp. 73-84, Apr.2000.
- [77] P. T. Chang and Y. T. Lo, "Modelling of job-shop scheduling with multiple quantitative and qualitative objectives and a GA/TS mixture approach," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 14, no. 4, pp. 367-384, Aug.2001.
- [78] W. Chang, "Ranking of fuzzy utilities with triangular membership functions," 1981, pp. 263-272.
- [79] C. T. Chen, "Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 114, no. 1, pp. 1-9, Aug.2000.
- [80] C. T. Chen, C. T. Lin, and S. F. Huang, "A fuzzy approach for supplier evaluation and selection in supply chain management," *International Journal of Production Economics*, vol. 102, no. 2, pp. 289-301, Aug.2006.
- [81] L. H. Chen and H. W. Lu, "An approximate approach for ranking fuzzy numbers based on left and right dominance," *Computers & Mathematics with Applications*, vol. 41, no. 12, pp. 1589-1602, June2001.
- [82] S. Chen, "Ranking fuzzy numbers with maximizing set and minimizing set," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 17, pp. 113-129, 1985.
- [83] S. J. Chen and C. L. Hwang, *Fuzzy Multiple Attribute Decision Making*, Springer-Verlang Berlin ed 1992.

- [84] S. J. Chen and L. Lin, "Decomposition of interdependent task group for concurrent engineering[small star, filled]," *Computers & industrial engineering*, vol. 44, no. 3, pp. 435-459, Mar.2003.
- [85] C. H. Cheng, "Evaluating naval tactical missile systems by fuzzy AHP based on the grade value of membership function," *European Journal of Operational Research*, vol. 96, no. 2, pp. 343-350, Jan.1997.
- [86] C. H. Cheng, K. L. Yang, and C. L. Hwang, "Evaluating attack helicopters by AHP based on linguistic variable weight," *European Journal of Operational Research*, vol. 116, no. 2, pp. 423-435, July1999.
- [87] H. Choi, "Analytic hierarchy process - It can work for group decision-support systems," *Computers & industrial engineering*, vol. 27, no. 1-4, pp. 167-171, 1994.
- [88] F. Choobineh and H. Li, "An index for ordering fuzzy numbers," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 54, pp. 287-294, 1993.
- [89] T. C. Chu, "Facility location selection using fuzzy TOPSIS under group decisions," *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, vol. 10, pp. 687-701, 2002.
- [90] T. C. Chu, "Selecting plant location via a fuzzy TOPSIS approach," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 20, pp. 859-864, 2002.
- [91] T. C. Chu and Y.-C. Lin, "A fuzzy TOPSIS method for robot selection," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 21, pp. 284-290, 2003.
- [92] P. T. Chuang, "Combining the analytic hierarchy process and quality function deployment for a location decision from a requirement perspective," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 18, no. 11, pp. 842-849, 2001.
- [93] A. Chwolka, "Group preference aggregation with the AHP - Implications for multiple-issue agendas," *European Journal of Operational Research*, vol. 132, no. 1, pp. 176-186, 2001.
- [94] E. Condon, B. Golden, and E. Wasil, "Visualizing group decisions in the analytic hierarchy process," *Computers & operations research*, vol. 30, no. 10, pp. 1435-1445, Sept.2003.
- [95] C. H. Coombs, "On the use of inconsistency of preferences in psychological measurement," *Journal of Experimental Psychology*, vol. 55, pp. 1-7, 1958.

- [96] M. Crary, "Sizing the US destroyer fleet," *European Journal of Operational Research*, vol. 136, no. 3, pp. 680-695, 2002.
- [97] T. J. Crowe, "Multi-attribute analysis of ISO 9000 registration using AHP," *The International journal of quality & reliability management*, vol. 15, no. 2-3 1998.
- [98] B. V. Dasarathy, "Smart: Similarity measured anchored ranking technique for the analysis of multidimensional data," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. SMC-6, no. 10, pp. 708-711, 1976.
- [99] M. A. P. Davis, "A multi-criteria decision model: Application for managing group decisions," *Journal of the Operational Research Society*, vol. 45, no. 1, pp. 47-58, 1994.
- [100] S. J. De Boer, "Decision Methods and Techniques in Methodical Engineering Design." Ph.D. Thesis De Lier: Academisch Boeken Centrum, 1989.
- [101] Degani R. and Bortolan G., "The problem of linguistic approximation in clinical decision making," *International journal of approximate reasoning*, vol. 2, no. 2, p. 98, 1988.
- [102] M. Delgado, J. L. Verdegay, and M. A. Vila, "A procedure for ranking fuzzy numbers using fuzzy relation," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 26 1988.
- [103] M. Delgado, J. L. Verdegay, and M. A. Vila, "Linguistic decision-making models," *International Journal of Intelligent Systems*, vol. 7, pp. 479-492, 1992.
- [104] M. Delgado, M. A. Vila, and W. Voxman, "On a canonical representation of fuzzy numbers," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 93, no. 1, pp. 125-135, Jan.1998.
- [105] H. Deng, C. H. Yeh, and R. J. Willis, "Inter-company comparison using modified TOPSIS with objective weights," *Computers & Operations Research*, vol. 27, no. 10, pp. 963-973, Sept.2000.
- [106] G. Dieter, *Engineering Design. A Materials and Processing Approach*. Tokyo: McGraw-Hill, 1983.
- [107] A. P. Dobias, "Designing a mouse trap using the Analytic Hierarchy Process and Expert Choice," *European Journal of Operational Research*, vol. 48, no. 1, pp. 57-65, 1990.
- [108] D. Dubois and H. Prade, "Ranking of fuzzy numbers in the setting of possibility theory," *Information Sciences*, vol. 30, pp. 183-224, 1983.

- [109] D. Dubois and H. Prade, "The mean value of a fuzzy number," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 24, no. 3, pp. 279-300, Dec.1987.
- [110] F. T. Dweiri and M. M. Kablan, "Using fuzzy decision making for the evaluation of the project management internal efficiency," *Decision Support Systems*, vol. 42, no. 2, pp. 712-726, Nov.2006.
- [111] F. Dweiri, "Fuzzy development of crisp activity relationship charts for facilities layout," *Computers & industrial engineering*, vol. 36, no. 1, pp. 1-16, 1999.
- [112] R. F. Easley, J. S. Valacich, and M. A. Venkataramanan, "Capturing group preferences in a multicriteria decision," *European Journal of Operational Research*, vol. 125, no. 1, pp. 73-83, Aug.2000.
- [113] W. Edwards and Barron F.H., "SMARTS and SMARTER: improves simple methods for multiattribute utility measurement," *Organizational Behaviour and Human Decision Processes*, vol. 60, no. 1, pp. 306-25, 1994.
- [114] J. Efstathiou and R. Tong, "Ranking fuzzy sets using linguistic preference relations," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. SMC-12, pp. 655-659, 1982.
- [115] I. C. Ehie, "Integrated multiobjective planning model: a case study of the Zambian copper mining industry," *European Journal of Operational Research*, vol. 68, no. 2, pp. 160-172, 1993.
- [116] T. Ertay, D. Ruan, and U. R. Tuzkaya, "Integrating data envelopment analysis and analytic hierarchy for the facility layout design in manufacturing systems," *Information Sciences*, vol. 176, no. 3, pp. 237-262, Feb.2006.
- [117] I. Ertugrul and N. Karakasiglu, "Comparison of fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methods for facility location selection," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 39, pp. 783-795, 2008.
- [118] I. Ertugrul and N. Karakasoglu, "Fuzzy TOPSIS Method for Academic Member Selection in Engineering Faculty," in *Innovations in E-learning, Instruction Technology, Assessment, and Engineering Education*. M.Iskander, Ed. Springer, 2007, pp. 151-156.
- [119] I. Ertugrul and N. Karakasoglu, "Performance evaluation of Turkish cement firms with fuzzy analytic hierarchy process and TOPSIS methods," *Expert Systems with Applications*, vol. 36, no. 1, pp. 702-715, Jan.2009.
- [120] Y. P. Fariborz, "An analytic model for locating facilities strategically," *Omega*, vol. 34, no. 1, p. 41, 2006.

- [121] G. Federkeil, "Rankings and Quality Assurance in Higher Education," *Higher Education in Europe*, vol. 33, no. 2/3, pp. 219-230, 2008.
- [122] L. C. Feng, Tzeng, and Hshuing, "Strategies of decreasing greenhouse gas emission for transportations section: An assessment and proposal," *Energy and Environmental Research [On line]*, pp. 1-14, 2007.
- [123] P. Ferrari, "A method for choosing from among alternative transportation projects," *European Journal of Operational Research*, vol. 150, no. 1, pp. 194-203, Oct.2003.
- [124] F. S. Fogliatto and S. L. Albin, "A hierarchical method for evaluating products with quantitative and sensory characteristics," *IIE transactions*, vol. 33, no. 12, pp. 1081-1092, 2001.
- [125] G. A. Forgionne, "An AHP analysis of quality in AI and DSS journals," *Omega*, vol. 30, no. 3, p. 171, 2002.
- [126] G. A. Forgionne and R. Kohli, "A multiple criteria assessment of decision technology system journal quality," *Information & Management*, vol. 38, no. 7, pp. 421-435, Aug.2001.
- [127] E. Forman and K. Peniwati, "Aggregating individual judgments and priorities with the analytic hierarchy process," *European Journal of Operational Research*, vol. 108, no. 1, pp. 165-169, July1998.
- [128] P. Fortemps and M. Roubens, "Ranking and defuzzification methods based on area compensation," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 82, no. 3, pp. 319-330, Sept.1996.
- [129] F. X. Frei and P. T. Harker, "Measuring aggregate process performance using AHP," *European Journal of Operational Research*, vol. 116, no. 2, pp. 436-442, July1999.
- [130] M. S. Garcia-Cascales, M. D. Gomez-López, and M. T. Lamata, "Decision en grupo para la ponderación de los criterios de evaluación, en el programa de evaluación institucional (PEI) para las titulaciones en el ámbito de la ingeniería industrial," *XII Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos. Zaragoza*, 2008.
- [131] M. S. Garcia-Cascales, M. D. Gomez-López, and M. T. Lamata, "Estudio de los criterios de evaluación en el Programa de Evaluación Institucional (PEI) de la ANECA para las titulaciones en el ámbito de la Ingeniería Industrial," *XII Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos. Zaragoza*, 2008.
- [132] M. S. Garcia-Cascales and M. T. Lamata, "Un problema de mantenimiento basado en el proceso analítico jerárquico," *X Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos. Valencia*, 2006.

- [133] M. S. Garcia-Cascales and M. T. Lamata, "A modification of the index of Liou and Wang for ranking fuzzy number," *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, vol. 15, no. 4, pp. 411-424, 2007.
- [134] M. S. Garcia-Cascales and M. T. Lamata, "Solving a decision problem with linguistic information," *Pattern Recognition Letters*, vol. 28, no. 16, pp. 2284-2294, Dec.2007.
- [135] M. S. Garcia-Cascales and M. T. Lamata, "Selection of a cleaning system for engine maintenance based on the analytic hierarchy process," *Computers & industrial engineering*, vol. In Press, Corrected Proof 2009.
- [136] Z. Gert, "Analytical approach of determining job division in manual assembly systems," *International Journal of Production Economics*, vol. 51, no. 1-2, pp. 123-2, 1997.
- [137] S. H. Ghodsypour and C. O'Brien, "A decision support system for supplier selection using an integrated analytic hierarchy process and linear programming," *International Journal of Production Economics*, vol. 56-57, pp. 199-212, Sept.1998.
- [138] B. L. Golden, "Nonlinear programming on a microcomputer," *Computers & operations research*, vol. 13, no. 2-3, pp. 149-166, 1986.
- [139] F. Gomez de Leon Higes and J. J. R. Cartagena, "Maintenance strategy based on a multicriterion classification of equipments," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 91, no. 4, pp. 444-451, Apr.2006.
- [140] R. R. Greenberg and T. R. Nunamaker, "Integrating the analytic hierarchy process (AHP) into the multiobjective budgeting models of public sector organizations," *Socio-economic planning sciences*, vol. 28, no. 3, pp. 197-206, 1994.
- [141] A. T. Gumus, "Evaluation of hazardous waste transportation firms by using a two step fuzzy-AHP and TOPSIS methodology," *Expert Systems with Applications*, vol. In Press, Corrected Proof.
- [142] L. H.M., "Applying fuzzy set theory to evaluate the rate of aggregative risk in software development," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 79, no. 3, pp. 323-336, May1996.
- [143] K. Hafeez, "Determining key capabilities of a firm using analytic hierarchy process," *International Journal of Production Economics*, vol. 76, no. 1, pp. 39-51, 2002.
- [144] R. P. Hamalainen, "Decision aid in the public debate on nuclear power," *European Journal of Operational Research*, vol. 48, no. 1, pp. 66-76, 1990.

- [145] R. Handfield, S. V. Walton, R. Sroufe, and S. A. Melnyk, "Applying environmental criteria to supplier assessment: A study in the application of the Analytical Hierarchy Process," *European Journal of Operational Research*, vol. 141, no. 1, pp. 70-87, Aug.2002.
- [146] N. Hanumaiah, B. Ravi, and N. P. Mukherjee, "Rapid hard tooling process selection using QFD-AHP methodology," *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 20, no. 5, pp. 319-337, 2006.
- [147] G. G. Hegde and P. R. Tadikamalla, "Site selection for a `sure service terminal'," *European Journal of Operational Research*, vol. 48, no. 1, pp. 77-80, Sept.1990.
- [148] S. Heilpern, "The expected value of a fuzzy number," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 47, no. 1, pp. 81-86, Apr.1992.
- [149] F. Herrera and E. Herrera-Viedma, "Linguistic decision analysis: steps for solving decision problems under linguistic information," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 115, pp. 67-82, 2002.
- [150] F. Herrera, E. Herrera-Viedma, and L. Martínez, "A fusion approach for managing multi-granularity linguistic term sets in decision making," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 114, no. 1, pp. 43-58, Aug.2000.
- [151] W. Ho, "Integrated analytic hierarchy process and its applications - A literature review," *European Journal of Operational Research*, vol. 186, no. 1, pp. 211-228, Apr.2008.
- [152] W. Ho, P. K. Dey, and H. Higson, "Mutiple criteria decision-making techniques in higher education," *International Journal of Educational Management*, vol. 20, no. 5, pp. 319-337, 2006.
- [153] R. Howard and J. Matherson, *The Principles and Applications of Decision Analysis* Strategic Decision Group: Menlo Park CA, 1984.
- [154] S. W. Hsiao, "Concurrent design method for developing a new product," *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 29, no. 1, pp. 41-55, Jan.2002.
- [155] C. C. Huang, P. Y. Chu, and Y. H. Chiang, "A fuzzy AHP application in government-sponsored R&D project selection," *Omega*, vol. 36, no. 6, pp. 1038-1052, Dec.2008.
- [156] C. L. Hwang and K. Yoon, *Multiple Attribute Decision Methods and Applications*, Springer, Berlin Heidelberg ed 1981.
- [157] G. R. Jahanshahloo, F. H. Lotfi, and M. Izadikhah, "An algorithmic method to extend TOPSIS for decision-making problems with interval

- data," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 175, no. 2, pp. 1375-1384, Apr.2006.
- [158] B. A. Jain and B. N. Nag, "A decision-support model for investment decisions in new ventures," *European Journal of Operational Research*, vol. 90, no. 3, pp. 473-486, May1996.
- [159] R. Jain, "Decision-making in the presence of fuzzy variables," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 6, pp. 698-703, 1976.
- [160] R. Jain, "A procedure of multiple-aspect decision making using fuzzy sets," *International Journal of Systems Sciences*, vol. 8, pp. 1-7, 1977.
- [161] S. a. Jen, "A unified framework for the selection of a Flexible Manufacturing System," *European Journal of Operational Research*, vol. 85, no. 2, p. 297, 1995.
- [162] H. W. Jung and B. Choi, "Optimization models for quality and cost of modular software systems," *European Journal of Operational Research*, vol. 112, no. 3, pp. 613-619, Feb.1999.
- [163] M. M. Kablan, "Decision support for energy conservation promotion:: an analytic hierarchy process approach," *Energy Policy*, vol. 32, no. 10, pp. 1151-1158, July2004.
- [164] J. Kacprzyk and R. R. Yager, "Linguistic summaries of data using fuzzy logic," *International Journal of General Systems*, vol. 30, pp. 133-154, 2001.
- [165] C. Kahraman, S. Āevik, N. Y. Ates, and M. Gülbay, "Fuzzy multi-criteria evaluation of industrial robotic systems," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 52, no. 4, pp. 414-433, May2007.
- [166] C. Kahraman, G. Büyüközkan, and N. Y. Ates, "A two phase multi-attribute decision-making approach for new product introduction," *Information Sciences*, vol. 177, no. 7, pp. 1567-1582, Apr.2007.
- [167] C. Kahraman, D. Ruan, and I. Dogan, "Fuzzy group decision-making for facility location selection," *Information Sciences*, vol. 157, pp. 135-153, Dec.2003.
- [168] H. Y. Kang and A. H. I. Lee, "Priority mix planning for semiconductor fabrication by fuzzy AHP ranking," *Expert Systems with Applications*, vol. 32, no. 2, pp. 560-570, Feb.2007.
- [169] J. Kangas and A. Kangas, "Multiple criteria decision support in forest management--the approach, methods applied, and experiences gained," *Forest Ecology and Management*, vol. 207, no. 1-2, pp. 133-143, Mar.2005.

- [170] A. Kaufmann and Gupta M.M., *Fuzzy Mathematical Models in Engineering and Management Science* North Holland, 1988.
- [171] P. G. W. Keen and M. S. Scott-Morton, *Decision Support System: An Organizational Perspective* Addison-Wesley, Inc, 1978, 1978.
- [172] R. Keeney and H. Raiffa, *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Values Tradeoffs*, Wiley, New York ed 1976.
- [173] A. Kengpol, "The development of a decision support tool for the selection of advanced technology to achieve rapid product development," *International Journal of Production Economics*, vol. 69, no. 2, p. 177, 2001.
- [174] E. E. Kerre, "The use of fuzzy set theory in electrocardiological diagnostics," M.M.Gupta and E.Sanchez, Eds. 1982, pp. 277-282.
- [175] A. Khalil, "Selecting the appropriate project delivery method using AHP," *International Journal of Project Management*, vol. 20, no. 6, pp. 464-469, 2002.
- [176] C. S. Kim and Y. Yoon, "Selection of a good expert system shell for instructional purposes in business," *Information & Management*, vol. 23, no. 5, pp. 249-262, Nov.1992.
- [177] J. Kim, "Hierarchical Structure of Intranet Functions and Their Relative Importance: : Using the Analytic Hierarchy Process for Virtual Organizations," *Decision Support Systems*, vol. 23, no. 1, pp. 59-74, May1998.
- [178] K. Kim and K. S. Park, "Ranking fuzzy numbers with index of optimism," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 35, no. 2, pp. 143-150, Apr.1990.
- [179] P. O. Kim, K. J. Lee, and B. W. Lee, "Selection of an optimal nuclear fuel cycle scenario by goal programming and the analytic hierarchy process," *Annals of Nuclear Energy*, vol. 26, no. 5, pp. 449-460, Mar.1999.
- [180] S. B. Kim and K. S. Whang, "Forecasting the capabilities of the Korean civil aircraft industry," *Omega*, vol. 21, no. 1, pp. 91-98, Jan.1993.
- [181] P. R. Kleindorfer, "Integrating manufacturing strategy and technology choice," *European Journal of Operational Research*, vol. 47, no. 2, pp. 214-224, 1990.
- [182] G. J. Klir and B. Yuan, *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic*, Prentice Hall PTR, New Jersey ed 1995.

- [183] S.-K. F. D. Ko, "Multiple reservoir system operational planning using multi-criterion decision analysis," *European Journal of Operational Research*, vol. 76, no. 3, pp. 428-439, 1994.
- [184] G. Koksál, "Planning and design of industrial engineering education quality," *Computers & industrial engineering*, vol. 35, no. 3-4, pp. 639-642, 1998.
- [185] W. Kolodziejczyk, "Orlovsky's concept of decision-making with fuzzy preference relation-further results," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 19, pp. 197-212, 1990.
- [186] J. Korpela, "An analytic approach to supply chain development," *International Journal of Production Economics*, vol. 71, no. 1-3, pp. 145-155, 2001.
- [187] J. Korpela, K. Kyláheiko, M. Tuominen, and A. Lehmusvaara, "Customer service based design of the supply chain," *International Journal of Production Economics*, vol. 69, no. 2, pp. 193-204, 2001.
- [188] J. Korpela, K. Kyláheiko, M. Tuominen, and A. Lehmusvaara, "An analytic approach to production capacity allocation and supply chain design," *International Journal of Production Economics*, vol. 78, no. 2, pp. 187-195, 2002.
- [189] J. Korpela, "Decision aid in warehouse site selection," *International Journal of Production Economics*, vol. 45, no. 1-3, pp. 169-180, 1996.
- [190] J. Korpela, "Customer oriented approach to warehouse network evaluation and design," *International Journal of Production Economics*, vol. 59, no. 1, pp. 135-146, 1999.
- [191] J. Korpela, K. Kyláheiko, A. Lehmusvaara, and M. Tuominen, "The Effect of Ecological Factors on Distribution Network Evaluation," *International Journal of Logistics Research and Applications*, vol. 4, no. 2, pp. 257-269, 2001.
- [192] J. Korpela, M. Tuominen, and M. Valoaho, "An analytic hierarchy process-based approach to the strategic management of logistic service: An empirical study in the mechanical forest industry," *International Journal of Production Economics*, vol. 56-57, pp. 303-318, Sept.1998.
- [193] M. S. Kuo, G. H. Tzeng, and W. C. Huang, "Group decision-making based on concepts of ideal and anti-ideal points in a fuzzy environment," *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 45, no. 3-4, pp. 324-339, Feb.2007.
- [194] R. J. Kuo, S. C. Chi, and S. S. Kao, "A decision support system for locating convenience store through fuzzy AHP," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 37, no. 1-2, pp. 323-326, Oct.1999.

- [195] M. Kurttila, M. Pesonen, J. Kangas, and M. Kajanus, "Utilizing the analytic hierarchy process (AHP) in SWOT analysis -- a hybrid method and its application to a forest-certification case," *Forest Policy and Economics*, vol. 1, no. 1, pp. 41-52, May2000.
- [196] K. Kwak, "A multicriteria decision-making approach to university resource allocations and information infrastructure planning," *European Journal of Operational Research*, vol. 110, no. 2, p. 234, 1998.
- [197] N. K. Kwak and C. W. Lee, "Business process reengineering for health-care system using multicriteria mathematical programming," *European Journal of Operational Research*, vol. 140, no. 2, pp. 447-458, July2002.
- [198] C. K. Kwong and H. Bai, "A fuzzy AHP approach to the determination of importance weights of customer requirements in quality function deployment," *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 13, no. 5, pp. 367-377, 2002.
- [199] C. K. Kwong and H. Bai, "Determining the importance weights for the customer requirements in QFD using a fuzzy AHP with an extent analysis approach," *IIE transactions*, vol. 35, no. 7, pp. 619-626, July2003.
- [200] A. W. Labib, "Intelligent maintenance model (system): An application of the analytic hierarchy process and a fuzzy logic rule-based controller," *The journal of the Operational Research Society*, vol. 49, no. 7, pp. 745-757, 1998.
- [201] V. S. Lai, R. P. Trueblood, and B. K. Wong, "Software selection: a case study of the application of the analytical hierarchical process to the selection of a multimedia authoring system," *Information & Management*, vol. 36, no. 4, pp. 221-232, Oct.1999.
- [202] V. S. Lai, B. K. Wong, and W. Cheung, "Group decision making in a multiple criteria environment: A case using the AHP in software selection," *European Journal of Operational Research*, vol. 137, no. 1, pp. 134-144, Feb.2002.
- [203] Y. J. Lai, C. L. Liu, and C. L. Hwang, "TOPSIS for MODM," *European Journal of Operational Research*, vol. 76, no. 3, pp. 486-500, 1994.
- [204] K. Lam and X. Zhao, "An application of quality function deployment to improve the quality of teaching," *International Journal of Quality and Reliability Management*, vol. 15, no. 4, pp. 389-413, 1998.
- [205] O. Larichev and H. Moshkovich, *ZAPROS: A method and system for ordering multiattribute alternatives on the basis of a decision-maker's preferences*. Moscow: Preprint of All Union Institute for Systems Studies, 1991.

- [206] O. Larichev, H. Moshkovich, A. Mechitov, and D. Olson, "Experiments comparing qualitative approaches to rank ordering of multiattribute alternatives," *Journal of Multicriteria Decision Analysis*, vol. 2, pp. 5-26, 1993.
- [207] C. E. Lee and S. C. Hsu, "Outsourcing capacity planning for an IC design house," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 24, no. 3-4, pp. 306-320, 2004.
- [208] C. W. Lee, "Information resource planning for a health-care system using an AHP-based goal programming method," *The journal of the Operational Research Society*, vol. 50, no. 12, p. 1191, 1999.
- [209] E. S. Lee and R. L. Li, "Comparison of fuzzy numbers based on the probability measure of fuzzy events," *Computers & Mathematics with Applications*, vol. 15, pp. 887-896, 1988.
- [210] M. Lee, H. Pham, and X. Zhang, "A methodology for priority setting with application to software development process," *European Journal of Operational Research*, vol. 118, no. 2, pp. 375-389, Oct.1999.
- [211] O. G. León, *Tomar decisiones difíciles*, Segunda Edición ed Universidad Autónoma de Madrid, 2001.
- [212] R. R. Levary, "An analytic hierarchy process based simulation model for entry mode decision regarding foreign direct investment," *Omega*, vol. 27, no. 6, p. 661, 1999.
- [213] E. Levrat, "Subjective evaluation of car seat comfort with fuzzy set techniques," *International Journal of Intelligent Systems*, vol. 12, no. 11-12, pp. 891-913, 1997.
- [214] Q. Li and H. D. Sherali, "An approach for analyzing foreign direct investment projects with application to China's Tumen River Area development," *Computers & Operations Research*, vol. 30, no. 10, pp. 1467-1485, Sept.2003.
- [215] X. Li, "Discussion on soft computing at FLINS'96," *International Journal of Intelligent Systems*, vol. 13, no. 2-3, pp. 287-300, 1998.
- [216] G. S. Liang, "Fuzzy MCDM based on ideal and anti-ideal concepts," *European Journal of Operational Research*, vol. 112, no. 3, pp. 682-691, Feb.1999.
- [217] M. J. Liberatore, R. E. Myers, R. L. Nydick, M. Steinberg, E. R. Brown, R. Gay, T. Powell, and R. L. Powell, "Decision counseling for men considering prostate cancer screening," *Computers & operations research*, vol. 30, no. 10, pp. 1421-1434, Sept.2003.

- [218] M. J. Liberatore and R. L. Nydick, "The analytic hierarchy process in medical and health care decision making: A literature review," *European Journal of Operational Research*, vol. 189, no. 1, pp. 194-207, Aug.2008.
- [219] H. T. Lin and W. L. Chang, "Order selection and pricing methods using flexible quantity and fuzzy approach for buyer evaluation," *European Journal of Operational Research*, vol. 187, no. 2, pp. 415-428, June2008.
- [220] T. S. Liou and M. J. Wang, "Ranking fuzzy numbers with integral value," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 50, pp. 247-255, 1992.
- [221] Lootsma F and Schuijt, "The Multiplicative AHP, SMART and ELECTRE in a common context," *Journal of Multicriteria Decision Analysis*, vol. 6, pp. 185-196, 1997.
- [222] LOU, "Ley Orgánica 6/2001 de 21 de Diciembre. Ley Orgánica de Universidades. BOE,"2001.
- [223] R. D. Luce and H. Raiffa, *Games and Decisions: Introduction and Critical Survey* New York. John Wiley and Sons, 1957.
- [224] S. Mabuchi, "An approach to the comparison of fuzzy subsets with  $\alpha$ -cut dependent index," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. SCM-18, pp. 264-272, 1988.
- [225] C. N. Madu, C. Kuei, and I. E. Madu, "A hierarchic metric approach for integration of green issues in manufacturing: a paper recycling application," *Journal of Environmental Management*, vol. 64, no. 3, pp. 261-272, Mar.2002.
- [226] S. Malladi and K. J. Min, "Decision support models for the selection of internet access technologies in rural communities," *Telematics and Informatics*, vol. 22, no. 3, pp. 201-219, Aug.2005.
- [227] M. K. Masozera, J. R. R. Alavalapati, S. K. Jacobson, and R. K. Shrestha, "Assessing the suitability of community-based management for the Nyungwe Forest Reserve, Rwanda," *Forest Policy and Economics*, vol. 8, no. 2, pp. 206-216, Mar.2006.
- [228] C. McCahone, "Fuzzy Set Theory Applied to Production and Inventory Control." Ph.D Thesis Department of Industrial Engineering, Kansas State University, 1987.
- [229] A. S. Milani, A. Shanian, R. Madoliat, and J. A. Nemes, "The effect of normalization norms in multiple attribute decision making models: a case study in gear material selection," *Industrial Applications*, vol. 29, p. -312, 2005.

- [230] G. Miller, "The magical number 7, plus or minus 2 - some limits on our capacity for processing information," *Psychological review*, vol. 63, no. 2, pp. 81-97, 1956.
- [231] I. Miyaji, Y. Nakagawa, and K. Ohno, "Decision support system for the composition of the examination problem," *European Journal of Operational Research*, vol. 80, no. 1, pp. 130-138, 1995.
- [232] M. Modarres, "Application of network theory and AHP in urban transportation to minimize earthquake damages," *The journal of the Operational Research Society*, vol. 53, no. 12, pp. 1308-1316, 2002.
- [233] R. P. Mohanty and S. G. Deshmukh, "Advanced manufacturing technology selection: A strategic model for learning and evaluation," *International Journal of Production Economics*, vol. 55, no. 3, pp. 295-307, Aug.1998.
- [234] J. A. Momoh, "Multiple indices for optimal reactive power pricing and control," *Decision Support Systems*, vol. 24, no. 3-4, pp. 223-232, 1999.
- [235] D. L. Mon, C. H. Cheng, and J. C. Lin, "Evaluating weapon system using fuzzy analytic hierarchy process based on entropy weight," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 62, no. 2, pp. 127-134, Mar.1994.
- [236] P. Montesinos, J. M. Carot, J. M. Martinez, and F. Mora, "Third Mission Ranking for World Class Universities," *Higher Education in Europe*, vol. 33, no. 2&3, pp. 259-270, 2008.
- [237] S. Murakami, S. Maeda, and Imamura S., "Fuzzy decision analysis on the development of centralized regional energy control system," 1983, pp. 363-368.
- [238] K. Muralidhar, R. Santhanam, and R. L. Wilson, "Using the analytic hierarchy process for information system project selection," *Information & Management*, vol. 18, no. 2, pp. 87-95, Feb.1990.
- [239] C. Muralidharan, N. Anantharaman, and S. G. Deshmukh, "Vendor rating in purchasing scenario: a confidence interval approach," *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 21, no. 9/10, p. 1305, Sept.2001.
- [240] S. Myint, "A framework of an intelligent quality function deployment (IQFD) for discrete assembly environment," *Computers & industrial engineering*, vol. 45, no. 2 SPEC., pp. 269-283, 2003.
- [241] K. Nakamura, "Preference relations on a set of fuzzy utilities as a basis for decision making," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 20, pp. 147-162, 1986.

- [242] E. W. T. Ngai, "Selection of web sites for online advertising using the AHP," *Information & Management*, vol. 40, no. 4, pp. 233-242, Mar.2003.
- [243] E. W. T. Ngai and E. W. C. Chan, "Evaluation of knowledge management tools using AHP," *Expert Systems with Applications*, vol. 29, no. 4, pp. 889-899, Nov.2005.
- [244] K. Nigim, N. Munier, and J. Green, "Pre-feasibility MCDM tools to aid communities in prioritizing local viable renewable energy sources," *Renewable Energy*, vol. 29, no. 11, pp. 1775-1791, Sept.2004.
- [245] K. A. Nigim, S. Suryanarayanan, R. Gorur, and R. G. Farmer, "The application of analytical hierarchy process to analyze the impact of hidden failures in special protection schemes," *Electric Power Systems Research*, vol. 67, no. 3, pp. 191-196, Dec.2003.
- [246] G. Noci, "Selecting quality-based programmes in small firms: A comparison between the fuzzy linguistic approach and the analytic hierarchy process," *International Journal of Production Economics*, vol. 67, no. 2, pp. 113-133, 2000.
- [247] S. E. F. a. Norah, "Promoting shared health care decision making using the analytic hierarchy process," *Socio-economic planning sciences*, vol. 33, no. 4, p. 277, 1999.
- [248] S. Öntüt, S. S. Kara, and E. Isik, "Long term supplier selection using a combined fuzzy MCDM approach: A case study for a telecommunication company," *Expert Systems with Applications*, vol. 36, no. 2, Part 2, pp. 3887-3895, Mar.2009.
- [249] S. Opricovic, *Multicriteria Optimization of Civil Engineering Systems*. Belgrade: 1998.
- [250] W. Ossadnik, "AHP-based synergy allocation to the partners in a merger," *European Journal of Operational Research*, vol. 88, no. 1, pp. 42-49, Jan.1996.
- [251] W. Ossadnik and O. Lange, "AHP-based evaluation of AHP-Software," *European Journal of Operational Research*, vol. 118, no. 3, pp. 578-588, Nov.1999.
- [252] M. S. Ozdemir and R. N. Gasimov, "The analytic hierarchy process and multiobjective 0-1 faculty course assignment," *European Journal of Operational Research*, vol. 157, no. 2, pp. 398-408, Sept.2004.
- [253] F. Y. Partovi, "A Quality Function Deployment Approach to Strategic Capital Budgeting," *Engineering Economist*, vol. 44, no. 3, p. 239, June1999.

- [254] F. Y. Partovi and J. M. Epperly, "A quality function deployment approach to task organization in peacekeeping force design," *Socio-economic planning sciences*, vol. 33, no. 2, pp. 131-149, June 1999.
- [255] G. E. Phillips-Wren, E. D. Hahn, and G. A. Forgionne, "A multiple-criteria framework for evaluation of decision support systems," *Omega*, vol. 32, no. 4, pp. 323-332, Aug. 2004.
- [256] K. L. Poh, "Transportation fuels and policy for Singapore: An AHP planning approach," *Computers & industrial engineering*, vol. 37, no. 3, pp. 507-525, 1999.
- [257] Power.D.J., "A brief history of decision support system," version 4.0 ed DSS Resources.COM, World Wide Web: 2007.
- [258] D. K. Radasch, "Integrated mathematical programming model for offset planning," *Computers & operations research*, vol. 25, no. 12, pp. 1069-1083, 1998.
- [259] K. S. Raju and C. R. S. Pillai, "Multicriterion decision making in river basin planning and development," *European Journal of Operational Research*, vol. 112, no. 2, pp. 249-257, Jan. 1999.
- [260] R. Ramanathan, "Using AHP for resource allocation problems," *European Journal of Operational Research*, vol. 80, no. 2, pp. 410-417, 1995.
- [261] RD, "Real Decreto 1393/2007, de 29 de Octubre, por el que se establece la ordenación de las enseñanzas universitarias oficiales," 2007.
- [262] J. L. Riggs, "Integration of technical, cost, and schedule risks in project management," *Computers & operations research*, vol. 21, no. 5, pp. 521-533, 1994.
- [263] S. Rios, S. Rios-Insua, and S. Rios-Insua, *Procesos de Decisión Multicriterio*. Madrid: EUDEMA S.A. (Ediciones de la Universidad Complutense, S.A.), 1989.
- [264] S. Rios-Insua, C. Bielza Lozoya, and A. Mateos Caballero, *Fundamentos de los Sistemas de Ayuda a la Decisión*. Madrid-España: 2002.
- [265] F. D. Robert, "Group decision support with the Analytic Hierarchy Process," *Decision Support Systems*, vol. 8, no. 2, p. 99, 1992.
- [266] C. Romero, *Teoría de la decisión Multicriterio: Conceptos, técnicas y aplicaciones*. Madrid: Alianza Editorial S.A., 1993.
- [267] M. D. Rossetti, "Multi-objective analysis of hospital delivery systems," *Computers & industrial engineering*, vol. 41, no. 3, pp. 309-333, 2001.

- [268] Roy B, *Methodologie Multicritere d'Aide a la Decision Economica*. Paris: 1985.
- [269] Roy B, "Decision-Aid and Decision Making," *European Journal of Operational Research*, vol. 45, pp. 324-331, 1991.
- [270] B. Roy and D. Vanderpooten, "An overview on "The European school of MCDA: Emergence, basic features and current works"," *European Journal of Operational Research*, vol. 99, no. 1, pp. 26-27, May1997.
- [271] D. Ryan Cook, S. Staschak, and W. T. Green, "Equitable allocation of livers for orthotopic transplantation: An application of the Analytic Hierarchy process," *European Journal of Operational Research*, vol. 48, no. 1, pp. 49-56, Sept.1990.
- [272] J. J. Saade and H. Schwarzlander, "Ordering fuzzy sets over the real line: An approach based on decision making under uncertainty," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 50, no. 3, pp. 237-246, Sept.1992.
- [273] T. L. Saaty, "The decision by the US Congress on China's trade status: a multicriteria analysis," *Socio-economic planning sciences*, vol. 35, no. 4, pp. 243-252, 2001.
- [274] T. L. Saaty, L. G. Vargas, and K. Dellmann, "The allocation of intangible resources: the analytic hierarchy process and linear programming," *Socio-economic planning sciences*, vol. 37, no. 3, pp. 169-184, Sept.2003.
- [275] T. Saaty, *The analytic hierarchy process* McGraw-Hill, New York, 1980.
- [276] T. Saaty, *Group Decision Making and the AHP*, Springer Verlag. New York. ed 1989.
- [277] T. Saaty, "An exposition of the AHP. In reply to the paper "Remarks on the analytic hierarchy process"," *Management science*, vol. 36, no. 3, pp. 259-268, 1990.
- [278] T. Saaty, *Fundamentals of decision making and priority theory*. Pittsburgh: RWS Publications, 1994.
- [279] J. Sadlak and J. L. N. C. Merisotis, "University Rankings: Seeking Prestige, Raising Visibility and Embedding Quality," *Higher Education in Europe*, vol. 33, no. 2&3, pp. 195-199, 2008.
- [280] R. F. Saen, A. Memariani, and F. H. Lotfi, "Determining relative efficiency of slightly non-homogeneous decision making units by data envelopment analysis: a case study in IROST," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 165, no. 2, pp. 313-328, June2005.

- [281] A. A. Salo, "Preference programming through approximate ratio comparisons," *European Journal of Operational Research*, vol. 82, no. 3, pp. 458-475, 1995.
- [282] M. Saremi, S. F. Mousavi, and A. Sanayei, "TQM consultant selection in SMEs with TOPSIS under fuzzy environment," *Expert Systems with Applications*, vol. 36, no. 2, Part 2, pp. 2742-2749, Mar.2009.
- [283] J. Sarkis, "A methodological framework for evaluating environmentally conscious manufacturing programs," *Computers & industrial engineering*, vol. 36, no. 4, p. 793, 1999.
- [284] M. J. Schniederjans, "Using the analytic hierarchy process and goal programming for information system project selection," *Information & Management*, vol. 20, no. 5 1991.
- [285] M. J. Schniederjans and T. Garvin, "Using the analytic hierarchy process and multi-objective programming for the selection of cost drivers in activity-based costing," *European Journal of Operational Research*, vol. 100, no. 1, pp. 72-80, July1997.
- [286] T. Schoenherr, V. M. Rao Tummala, and T. P. Harrison, "Assessing supply chain risks with the analytic hierarchy process: Providing decision support for the offshoring decision by a US manufacturing company," *Journal of Purchasing and Supply Management*, vol. 14, no. 2, pp. 100-111, June2008.
- [287] Z. SH, "An analytic evaluation of microcomputer educational OR/MS Software," *Omega*, vol. 19, no. 6, p. 639, 1991.
- [288] H. S. Shih, "Incremental analysis for MCDM with an application to group TOPSIS," *European Journal of Operational Research*, vol. 186, no. 2, pp. 720-734, Apr.2008.
- [289] H. S. Shih, H. J. Shyur, and E. S. Lee, "An extension of TOPSIS for group decision making," *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 45, no. 7-8, pp. 801-813, Apr.2007.
- [290] J. P. Shim, M. Warkentin, J. F. Courtney, D. J. Power, R. Sharda, and C. Carlsson, "Past, present, and future of decision support technology\*1," *Decision Support Systems*, vol. 33, no. 2, pp. 111-126, June2002.
- [291] H. Shinno, H. Yoshioka, S. Marpaung, and S. Hachiga, "Quantitative SWOT analysis on global competitiveness of machine tool industry," *Journal of Engineering Design*, vol. 17, no. 3, pp. 251-258, June2006.
- [292] H. Simon, *The New Science of Management Decision*. New York: Harper and Row, 1960.

- [293] E. B. Sloane, M. J. Liberatore, R. L. Nydick, W. Luo, and Q. B. Chung, "Using the analytic hierarchy process as a clinical engineering tool to facilitate an iterative, multidisciplinary, microeconomic health technology assessment," *Computers & Operations Research*, vol. 30, no. 10, pp. 1447-1465, Sept.2003.
- [294] S. E. Smith, "Change and innovation in higher education: a role for corporate strategy?," *Higher Education*, vol. 16, pp. 37-52, 1987.
- [295] R. Sprage and E. Carlson, *Building Effective Decisions Support Systems* Prentice-Hall. Englewood Cliffs. DJ, 1982.
- [296] V. Srinivasan and P. J. Bolster, "An industrial bond rating model based on the Analytic Hierarchy Process," *European Journal of Operational Research*, vol. 48, no. 1, pp. 105-119, Sept.1990.
- [297] B. Stannard, S. Zahir, and E. S. Rosenbloom, "Application of Analytic Hierarchy Process in multi-objetive mixed integer programming for airlift capacity planning," *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, vol. 23, no. 1, pp. 61-76, Mar.2006.
- [298] J. C.-Y. Su, S. J. Chen, and L. Lin, "A structured approach to measuring functional dependency and sequencing of coupled tasks in engineering design," *Computers & industrial engineering*, vol. 45, no. 1, pp. 195-214, June2003.
- [299] N. C. Suresh, "Flexible automation investments: A synthesis of two multi-objective modeling approaches," *Computers & industrial engineering*, vol. 22, no. 3, pp. 257-272, 1992.
- [300] Y. Takamura and K. Tone, "A comparative site evaluation study for relocating Japanese government agencies out of Tokyo," *Socio-economic planning sciences*, vol. 37, no. 2, pp. 85-102, June2003.
- [301] M. C. Y. Tam and V. M. R. Tummala, "An application of the AHP in vendor selection of a telecommunications system," *Omega*, vol. 29, no. 2, pp. 171-182, Apr.2001.
- [302] M. Tavana, "CROSS: A multicriteria group-decision-making model for evaluating and prioritizing advanced-technology projects at NASA," *Interfaces*, vol. 33, no. 3, p. 40, 2003.
- [303] M. Tong and P. P. Bonissone, "A linguistic approach to decision making with fuzzy sets," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 10, no. 11, pp. 716-723, 1980.
- [304] R. Tong and P. P. Bonissone, "Linguistic solutions to fuzzy decision problems," in *TIMS/Studies in the Management Science*. H. J. Zimmermann, Ed. Elsevier Science Publishers B.C., North-Holland, 1984, pp. 323-334.

- [305] V. Torra, "Negation functions based semantics for ordered linguistic labels," *International Journal of Intelligent Systems*, vol. 11, no. 11, pp. 975-988, 1996.
- [306] V. Torra, "Aggregation of linguistic labels when semantics is based on antonyms," *International Journal of Intelligent Systems*, vol. 16, no. 4, pp. 513-524, 2001.
- [307] E. Triantaphyllou, *Multi-Criteria Decision Making Methods: A Comparative Study*, Kluwer Academic Publishers ed 2000.
- [308] S. H. Tsaur, T. Y. Chang, and C. H. Yen, "The evaluation of airline service quality by fuzzy MCDM," *Tourism Management*, vol. 23, no. 2, pp. 107-115, Apr.2002.
- [309] Y. Tsukamoto, Nikiforuk P.N., and Gupta M.M., "On the comparison of fuzzy sets using fuzzy chooping," in *Control Science and Technology for Progress fo society*, H. Akashi (ed.) ed Pergamon Press, New York, 1983, pp. 46-51.
- [310] E. Turban, J. E. Aronson, T.-P. Liang, and R. Sharda, *Decision Support and Business Intelligence Systems (8th Edition)* 2006.
- [311] R. Tyagi and C. Das, "A methodology for cost versus service trade-offs in wholesale location-distribution using mathematical programming and analytic hierarchy process," *Journal of Business Logistics*, vol. 18, no. 2, pp. 77-99, Sept.1997.
- [312] G. H. Tzeng, C. W. Lin, and S. Opricovic, "Multi-criteria analysis of alternative-fuel buses for public transportation," *Energy Policy*, vol. In Press, Corrected Proof.
- [313] O. S. Vaidya and S. Kumar, "Analytic hierarchy process: An overview of applications," *European Journal of Operational Research*, vol. 169, no. 1, pp. 1-29, Feb.2006.
- [314] G. Vargas, "An overview of the Analytic Hierachy Process and its Applications," *European Journal of Operational Research*, vol. 48, pp. 2-8, 1990.
- [315] J. L. Verdegay, R. R. Yager, and P. P. Bonissone, "On heuristics as a fundamental constituent of soft computing," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 159, no. 7, pp. 846-855, Apr.2008.
- [316] J. P. Vinke and J. P. Brans, "A preference ranking organization method - (the PROMETHEE method for multiple criteria decision-making)," *Management science*, vol. 31, no. 6, pp. 647-656, 1985.

- [317] J. Von Neumann and O. Morgenstern, *Theory of games and economic behaviour*. Princeton: Princeton University Press, 1944.
- [318] Wang X and E. E. Kerre, "On the clasification and the dependencuiues of the ordering methods," in *Fuzzy Logic Foundations and Indsutrial Applications*. D.Ruan, Ed. Kluwer Academic Phublishers, Dorodrecht, 1996, pp. 73-88.
- [319] G. Wang and S. H. Huang, "Manufacturing supply chain design and evaluation," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 25, no. 1-2, pp. 93-100, 2005.
- [320] G. Wang, S. H. Huang, and J. P. Dismukes, "Product-driven supply chain selection using integrated multi-criteria decision-making methodology," *International Journal of Production Economics*, vol. 91, no. 1, pp. 1-15, Sept.2004.
- [321] H. Wang and M. Xie, "A comparative study of the prioritization matrix method and the analytic hierarchy process..," *Total Quality Management*, vol. 9, no. 6, p. 421, Aug.1998.
- [322] R. C. Wang and T. F. Liang, "Application of fuzzy multi-objective linear programming to aggregate production planning," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 46, no. 1, pp. 17-41, Mar.2004.
- [323] T. C. Wang and T. H. Chang, "Application of TOPSIS in evaluating initial training aircraft under a fuzzy environment," *Expert Systems with Applications*, vol. 33, no. 4, pp. 870-880, Nov.2007.
- [324] X. Wang and E. E. Kerre, "Reasonable properties for the ordering of fuzzy quantities (I)\*1," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 118, no. 3, pp. 375-385, Mar.2001.
- [325] X. Wang and E. E. Kerre, "Reasonable properties for the ordering of fuzzy quantities (II)\*1," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 118, no. 3, pp. 387-405, Mar.2001.
- [326] Y. M. Wang and K. S. Chin, "A linear goal programming priority method for fuzzy analytic hierarchy process and its applications in new product screening," *International Journal of Approximate Reasoning*, vol. In Press, Corrected Proof.
- [327] Y. M. Wang and T. M. S. Elhag, "Fuzzy TOPSIS method based on alpha level sets with an application to bridge risk assessment," *Expert Systems with Applications*, vol. 31, no. 2, pp. 309-319, Aug.2006.
- [328] Y. M. Wang, Y. Luo, and Z. Hua, "On the extent analysis method for fuzzy AHP and its applications," *European Journal of Operational Research*, vol. 186, no. 2, pp. 735-747, Apr.2008.

- [329] Watson S.R., J. J. Weiss, and Donnel M.L., "Fuzzy decision analysis," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 9, pp. 1-9, 1979.
- [330] S. F. Weber, "A Modified Analytic Hierarchy Process for Automated Manufacturing Decisions," *Interfaces*, vol. 23, no. 4, pp. 75-84, July1993.
- [331] M. Weck, F. Klocke, H. Schell, and E. R<sup>3</sup>enauver, "Evaluating alternative production cycles using the extended fuzzy AHP method," *European Journal of Operational Research*, vol. 100, no. 2, pp. 351-366, July1997.
- [332] W. C. Wedley, "Magnitude adjustment for AHP benefit/cost ratios," *European Journal of Operational Research*, vol. 133, no. 2, pp. 342-351, 2001.
- [333] E. d. Weert, "A macro-analysis of quality assessment in higher education," *Higher Education*, vol. 19, no. 57, p. 72, 1990.
- [334] C. C. Wei, C. F. Chien, and M. J. Wang, "An AHP-based approach to ERP system selection," *International Journal of Production Economics*, vol. 96, no. 1, pp. 47-62, Apr.2005.
- [335] E. N. Weiss, "Fly now or fly later? The delayed consumption problem," *European Journal of Operational Research*, vol. 48, no. 1, pp. 128-135, Sept.1990.
- [336] W. Weiwu, "Highway transportation comprehensive evaluation," *Computers & industrial engineering*, vol. 27, no. 1-4, pp. 257-260, 1994.
- [337] J. A. Wu and N. D. Wu, "A strategic planning model: Structuring and analyzing via analytic hierarchy process," *Industrial Management & Data Systems*, vol. 91, no. 6 1991.
- [338] S. Xu, L. D. Xu, and X. Chen, "Determining optimum edible films for kiwifruits using an analytical hierarchy process," *Computers & operations research*, vol. 30, no. 6, pp. 877-886, May2003.
- [339] Z. Xu, "A method based on linguistic aggregation operators for group decision making with linguistic preference relations," *Information Sciences*, vol. 166, no. 1-4, pp. 19-30, Oct.2004.
- [340] R. R. Yager, "Aggregation operators and fuzzy systems modeling," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 67, no. 2, pp. 129-145, Oct.1994.
- [341] R. R. Yager, "Ranking fuzzy subsets over the unit interval," *Proc 978 CDC*, pp. 1435-1437, 1978.

- [342] R. R. Yager, "On choosing between fuzzy subsets," *Kybernetes*, vol. 9, pp. 151-154, 1980.
- [343] R. R. Yager, "A procedure for ordering fuzzy subsets of the unit interval," *Information Sciences*, vol. 24, pp. 143-161, 1981.
- [344] R. R. Yager, "An approach to ordinal decision making," *International journal of approximate reasoning*, vol. 12, no. 3-4, pp. 237-261, 1995.
- [345] T. Yang, M. C. Chen, and C. C. Hung, "Multiple attribute decision-making methods for the dynamic operator allocation problem," *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 73, no. 5, pp. 285-299, Jan.2007.
- [346] T. Yang and C. C. Hung, "Multiple-attribute decision making methods for plant layout design problem," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 23, no. 1, pp. 126-137, Feb.2007.
- [347] T. Yang and C. Kuo, "A hierarchical AHP/DEA methodology for the facilities layout design problem," *European Journal of Operational Research*, vol. 147, no. 1, pp. 128-136, May2003.
- [348] C. H. Yeh and Y. H. Chang, "Modeling subjective evaluation for fuzzy group multicriteria decision making," *European Journal of Operational Research*, vol. 194, no. 2, pp. 464-473, Apr.2009.
- [349] P. L. Yu, "A class of solutions for group decision problems," *Management science*, vol. 19, no. 8, pp. 936-946, 1973.
- [350] Y. Yuan, "Criteria for evaluating fuzzy ranking methods," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 43, no. 2, pp. 139-157, Sept.1991.
- [351] M. Yurdakul, "Selection of computer-integrated manufacturing technologies using a combined analytic hierarchy process and goal programming model," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 20, no. 4, pp. 329-340, Aug.2004.
- [352] S. Yurimoto, "Design of a decision support system for overseas plant location in the EC," *International Journal of Production Economics*, vol. 41, no. 1-3 1995.
- [353] L. A. Zadeh, "Fuzzy Sets," *Information and Control*, pp. 338-353, 1965.
- [354] L. A. Zadeh, "The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning: Part 1," *Information Sciences*, vol. 8, no. 3, pp. 199-249, 1975.

- [355] L. A. Zadeh, "The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning: Part 2," *Information Sciences*, vol. 8, no. 4, pp. 301-357, 1975.
- [356] L. A. Zadeh, "The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning: Part 3," *Information Sciences*, vol. 9, no. 1, pp. 43-85, 1975.
- [357] L. A. Zadeh, "Soft computing and fuzzy logic," *IEEE Software*, vol. 11, no. 6, pp. 48-56, 1994.
- [358] L. A. Zadeh, "Applied Soft Computing; Foreword," *Applied soft computing*, vol. 1, no. 1, p. 1, 2001.
- [359] L. A. Zadeh and J. Kacprzyk, *Computing with words in Information/Intelligent Systems Part 1*. Heidelberg and New York: Physica-Verlag (Springer-Verlag), 1999.
- [360] L. A. Zadeh and J. Kacprzyk, *Computing with words in Information/Intelligent Systems. Part 2*. Heidelberg and New York: Physica-Verlag (Springer-Verlag), 1999.
- [361] L. A. Zadeh, "Soft computing and fuzzy logic," *IEEE Software*, vol. 11, no. 6, pp. 48-56, 1994.
- [362] L. A. Zadeh, "Fuzzy logic = computing with words," *IEEE transactions on fuzzy systems*, vol. 4, no. 2, pp. 103-111, 1996.
- [363] A. Zakarian, "Forming teams: an analytical approach," *IIE transactions*, vol. 31, no. 1, pp. 85-97, 1999.
- [364] M. Zeleny, "Compromise programming," in *Multi criteria decision making*. J.-L. Cochrane and M. Zeleny, Eds. Columbia: University of South Carolina. USA, 1973, pp. 262-301.
- [365] M. Zeleny, *Multiple criteria decision making*. New-York: McGrawHill, 1982.
- [366] G. Zhang and J. Lu, "An integrated group decision-making method dealing with fuzzy preferences for alternatives and individual judgements for selection criteria," *Group Decision and Negotiation*, vol. 12, pp. 501-515, 2003.
- [367] R. Zhao and R. Govind, "Algebraic characteristics of extended fuzzy numbers," *Information Sciences*, vol. 54, no. 1-2, pp. 103-130, Mar.1991.
- [368] Z. Zhou, S. Cheng, and B. Hua, "Supply chain optimization of continuous process industries with sustainability considerations," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 24, no. 2-7, pp. 1151-1158, July2000.