



UNIVERSIDAD DE GRANADA

**Departamento de Ciencias de la Computación e
Inteligencia Artificial**

**MODELOS DE EVALUACIÓN DE LA IMPORTANCIA DEL
IMPACTO AMBIENTAL EN CONTEXTOS COMPLEJOS BAJO
INCERTIDUMBRE**

MEMORIA DE TESIS PRESENTADA POR

Yeleny Zulueta Véliz

UNIVERSIDAD DE GRANADA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Informática y
Telecomunicación

Departamento de Ciencias de la Computación e
Inteligencia Artificial



MODELOS DE EVALUACIÓN DE LA IMPORTANCIA DEL IMPACTO
AMBIENTAL EN CONTEXTOS COMPLEJOS BAJO INCERTIDUMBRE

MEMORIA DE TESIS PRESENTADA POR

Yeleny Zulueta Véliz

PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTORA EN
TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LA COMUNICACIÓN

DIRECTOR

DR. LUIS MARTÍNEZ LÓPEZ

Granada, Marzo de 2014

La memoria titulada *Modelos de Evaluación de la Importancia del Impacto Ambiental en Entornos Complejos Bajo Incertidumbre*, que presenta D^a Yeleny Zulueta Véliz para optar al grado de Doctora en Informática, ha sido realizada en el Departamento de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial de la Universidad de Granada bajo la dirección del Doctor Luis Martínez López.

La doctoranda y el director de la tesis, garantizamos al firmar esta tesis doctoral, que el trabajo ha sido realizado por el doctorando bajo la supervisión del director de la tesis y hasta donde nuestro conocimiento alcanza, en la realización del trabajo, se han respetado los derechos de otros autores a ser citados, cuando se han utilizado sus resultados o publicaciones.

En Granada, a 27 de marzo de 2014.

La Doctoranda:



D^a Yeleny Zulueta Véliz

El Director:



Fdo. Dr. Luis Martínez López

Agradecimientos

Por el especial significado de esta tesis doctoral en mi vida profesional y personal, quiero agradecer a quienes me han ayudado a alcanzar este reto:

En primer lugar, al Director de tesis, Dr. Luis Martínez López, por su empeño, dedicación y apoyo incondicional en el desarrollo de esta investigación; sin dudas la oportunidad de conocerle y el privilegio de trabajar con él han marcado mi formación científica y como ser humano.

Al Tutor de esta investigación, Dr. Rafael Bello Pérez, por su excelente guía y colaboración durante este período.

A Juan Martínez y Rosa Rodríguez, por su contribución a los resultados expuestos en esta memoria.

A los miembros del Grupo *SINBAD*², por su acogida y apoyo durante mis estancias de investigación en la Universidad de Jaén, en especial a Jorge, Francisco, Iván, Macarena, Pedro y Francis.

A mis amigos por el ánimo que me han dado, especialmente a Zayli y Lilianes. A David, por su ayuda. A Isa, Mileidys y Mary, además, por el afecto y la generosidad durante mis días en Jaén.

A mis colegas de trabajo, que durante mis ausencias han defendido mis objetivos como suyos.

A la Universidad de las Ciencias Informáticas, la Universidad de Jaén, la Universidad de Granada y la Asociación Universitaria Iberoamericana de Postgrado, por permitirme formar parte del Programa de Doctorado Iberoamericano en Soft-computing y Sistemas Inteligentes.

Por último, “mención especial” para mi familia toda, para mi hermana Yaidarys y para Eder. Su cariño y comprensión han hecho el camino menos difícil. Isa, Jorge ya se incluyen aquí.

Índice general

Índice de Tablas	VI
Índice de Figuras	IX
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Estructura	4
2. Evaluación de la Importancia del Impacto Ambiental y Análisis de Decisión	7
2.1. Evaluación de la Importancia del Impacto Ambiental	8
2.1.1. Conceptos Fundamentales Relacionados con la Evaluación de la Importancia del Impacto Ambiental	8
2.1.2. El Proceso de EIIA	11
2.1.3. Métodos Tradicionales de EIIA	16
2.1.3.1. Matriz de Leopold	16
2.1.3.2. Método de Conesa	18
2.1.3.3. Método de Bojórquez	24
2.1.4. Clasificación de Impactos Ambientales	26
2.1.4.1. La Interacción Acción-Función del Entorno	26
2.1.4.2. La Persistencia en el Tiempo de los Impactos Ambientales	28
2.2. EIIA Basada en Análisis de Decisión	30
2.2.1. Caracterización de los Problemas de Toma de Decisión	30
2.2.2. Modelado de Información en Problemas de Toma de Decisión	38

2.2.3.	Resolución de Problemas de Toma de Decisión	42
2.2.4.	Análisis de Decisión y Procesos de Evaluación	43
2.2.5.	Principales Limitaciones para la Toma de Decisión en la EIHA	45
3.	Contextos Complejos en Toma de Decisión: Tratamiento de In-	
	formación Heterogénea y Modelado Dinámico	51
3.1.	Tratamiento de Información Heterogénea	52
3.1.1.	Enfoques para el Tratamiento de Información Heterogénea .	52
3.1.2.	Tratamiento de Información Heterogénea Basado en la Fu-	
	sión Lingüística Utilizando el Modelo de Representación 2-	
	tupla	57
3.2.	Modelado Dinámico en Toma de Decisión	61
3.2.1.	Caracterización de los Problemas de TDD	61
3.2.2.	Enfoques para la Resolución de Problemas de TDD	63
3.2.3.	Modelo General para la Toma de Decisión Dinámica	66
4.	Modelo de Evaluación de la Importancia del Impacto Ambiental	
	en Contextos Heterogéneos	71
4.1.	Modelo de Evaluación de la Importancia del Impacto Ambiental con	
	Información Heterogénea	72
4.1.1.	Esquema General	72
4.1.2.	Definición del Marco Heterogéneo de Evaluación	74
4.1.3.	Recopilación de Preferencias	75
4.1.4.	Evaluación de Alternativas	76
4.1.4.1.	Normalización	77
4.1.4.2.	Unificación	78
4.1.4.3.	Agregación Multietapa	80
4.1.4.4.	Resultados	86
4.2.	Aplicación del MH-EIHA: Caso de Estudio <i>Reconversión Tecnológica</i>	
	<i>de la Planta de Cloro Sosa de Sagua la Grande</i>	86
4.2.1.	Política Ambiental Cubana	86
4.2.2.	Descripción del Problema de EIHA	88
4.2.3.	Resolución del Problema de EIHA	90
4.2.3.1.	Definición del Marco Heterogéneo de Evaluación .	90
4.2.3.2.	Recopilación de Preferencias	93

4.2.3.3.	Evaluación de Alternativas	95
4.2.3.4.	Normalización	95
4.2.3.5.	Unificación	95
4.2.3.6.	Agregación Multietapa	97
4.2.3.7.	Resultados	99
4.2.4.	Análisis de Resultados	100
4.3.	Extensión del MH-EIIA para el Modelado de Información en Contextos Dudosos	103
4.3.1.	Definición del Marco Heterogéneo de Evaluación	104
4.3.2.	Recopilación de Preferencias	105
4.3.3.	Evaluación de Alternativas	106
4.3.3.1.	Tratamiento de la Información Difusa Dudosa	106
4.3.3.2.	Normalización	108
4.3.3.3.	Unificación	109
5.	Modelo de Evaluación Dinámica de la Importancia del Impacto Ambiental	113
5.1.	Limitación del Modelo General de TDD	115
5.2.	Un Nuevo Modelo Discriminativo de Toma de Decisión Dinámica (MD-TDD)	118
5.2.1.	Cálculo del Índice Discriminativo Dinámico	119
5.3.	Modelo de Evaluación de la Importancia del Impacto Ambiental con Información Heterogénea en Contextos Dinámicos	125
5.3.1.	Esquema General	126
5.3.2.	Definición del Marco Heterogéneo de Evaluación	127
5.3.3.	Recopilación de Preferencias	128
5.3.4.	Evaluación de Alternativas	128
5.3.4.1.	Agregación Multietapa	128
5.3.4.2.	Agregación Dinámica	129
5.3.4.3.	Agregación Discriminativa	130
5.3.4.4.	Resultados	130
5.3.4.5.	Actualización de la Información Histórica	130
5.4.	Aplicación del MHD-EIIA	131
5.4.1.	Descripción del Problema de EIIA	131

5.4.2.	Resolución del Problema de EIHA	134
5.4.3.	Análisis de Resultados	137
6.	Sistema para la Evaluación de la Importancia del Impacto Ambiental	139
6.1.	Arquitectura	139
6.2.	Herramientas y Lenguajes	141
6.2.1.	Metodología de Desarrollo: Programación Extrema (XP) . .	141
6.2.2.	Herramienta de Modelado: Visual Paradigm 8.0	141
6.2.3.	Lenguajes de Programación	141
6.2.4.	Frameworks	142
6.2.5.	Entorno Integrado de Desarrollo: <i>Eclipse-indigo</i>	143
6.2.6.	Sistema Gestor de Base de Datos: <i>PostgreSQL 8.4.2</i> . . .	143
6.2.7.	Servidor Web: <i>Apache Tomcat 7.0.23</i>	143
6.3.	Usuarios y Funcionalidades del SEVIA	144
6.3.1.	Subsistema Administración	145
6.3.2.	Subsistema Evaluación	150
7.	Conclusiones y Trabajos Futuros	153
7.1.	Conclusiones	153
7.2.	Trabajos Futuros	156
7.3.	Contribuciones	157
A.	Modelado Lingüístico Difuso de Información Lingüística	159
A.1.	Lógica Difusa	160
A.1.1.	Conjuntos Difusos y Funciones de Pertenencia	161
A.1.2.	Tipos de Funciones de Pertenencia	163
A.2.	El Enfoque Lingüístico Difuso	164
A.2.1.	Elección del CTL	166
A.2.2.	Definición de la Semántica del CTL	167
A.3.	Computación con Palabras	170
A.4.	Modelo Lingüístico de Representación 2-tupla	171
A.5.	Construcción de una Jerarquía Lingüística	174
A.6.	Modelado de Información en Contextos Dudosos	176
A.6.1.	Conjuntos Difusos Dudosos	177

A.6.2. Conjuntos de Términos Lingüísticos Difusos Dudosos	178
B. Operadores de Agregación	181
B.1. Agregación de información	181
B.2. Operadores de Agregación	182
C. Recopilación de Preferencias para el Caso de Estudio	187
Referencias Bibliográficas	196

Índice de tablas

4.1. Preferencias heterogéneas de los expertos	76
4.2. Preferencias heterogéneas normalizadas	78
4.3. Preferencias unificadas en 2-tuplas lingüísticas	79
4.4. Valores colectivos de los criterios	81
4.5. Importancia de los impactos	82
4.6. Valores finales de importancia	85
4.7. Criterios, pesos y dominios en los que serán evaluados	93
4.8. Preferencias heterogéneas recopiladas	94
4.9. Preferencias unificadas en 2-tuplas lingüísticas	96
4.10. Valor colectivo de los criterios	97
4.11. Importancia de cada impacto	98
4.12. Importancia ajustada de cada impacto	98
4.13. Ranking de factores	100
4.14. Ranking de acciones	100
4.15. Ranking de acciones ponderado	100
5.1. Resultados obtenidos para la Situación a).	116
5.2. Resultados obtenidos para la Situación b).	117
5.3. Características de los operadores de agregación utilizados en el MD-TDD	122
5.4. Resultados en cada año.	135
5.5. Ranking de proyectos obtenidos mediante diferentes modelos	137
6.1. Usuarios de SEVIIA	144
A.1. Ejemplos de jerarquías lingüísticas de dos niveles	175

C.1. Preferencias para los impactos I_{11} , I_{13} , I_{15} , I_{16} y I_{110}	188
C.2. Preferencias para los impactos I_{21} , I_{22} , I_{24} , I_{25} , I_{26} , I_{28} y I_{210} . . .	189
C.3. Preferencias para los impactos I_{31} , I_{32} , I_{33} , I_{34} , I_{35} , I_{36} , I_{37} , I_{38} y I_{310}	190
C.4. Preferencias para los impactos I_{41} , I_{43} , I_{44} , I_{45} , I_{46} , I_{47} , I_{48} , I_{49} y I_{410}	191
C.5. Preferencias para los impactos I_{51} , I_{52} , I_{53} , I_{54} , I_{55} , I_{56} , I_{58} , I_{59} y I_{510}	192
C.6. Preferencias para los impactos I_{61} , I_{62} , I_{63} , I_{64} , I_{65} , I_{66} , I_{67} , I_{68} , I_{69} y I_{610}	193
C.7. Preferencias para los impactos I_{71} , I_{72} , I_{74} , I_{75} , I_{76} , I_{77} , I_{78} y I_{710} . . .	194
C.8. Preferencias para los impactos I_{82} , I_{83} , I_{85} , I_{86} , I_{87} , I_{89} y I_{810} . . .	195

Índice de figuras

2.1. Procedimiento general para EIIA	12
2.2. Jerarquía de acciones del Proyecto	12
2.3. Jerarquía de factores del Entorno	14
2.4. Matriz de Leopold	17
2.5. Matriz de Conesa	19
2.6. Matriz de Bojórquez	25
2.7. Esquema de resolución general de un problema de toma de decisión	42
2.8. Proceso de toma de decisión (adaptado de [48])	43
2.9. Elementos básicos del Análisis de Decisión [93]	45
2.10. Aproximaciones fijas en EIIA	47
2.11. Roles comunes implicados en procesos de EIIA (adaptado de [112])	48
3.1. Clasificación de Enfoques para el Tratamiento de Información Heterogénea en Problemas de Toma de Decisión	53
3.2. Resolución basada en la manipulación directa de la información	53
3.3. Resolución basada en la unificación en números difusos	54
3.4. Resolución basada en la unificación en valores lingüísticos	55
3.5. La unificación en 2-tuplas lingüísticas	57
3.6. Clasificación de Enfoques para el Modelado Dinámico en Problemas de Toma de Decisión	63
3.7. Esquema de resolución multiperíodo para problemas de TDD	64
3.8. Esquema general de resolución de un problema de TDD	65
3.9. Operaciones en el Modelo General para la TDD (adaptado de [35])	67
4.1. Esquema general del MH-EIIA	73

4.2. MH-EIIA en el proceso general de EIIA	74
4.3. CTL de cinco términos simétricamente distribuidos	78
4.4. Transformación de valores en S^7	79
4.5. Proceso de Agregación Multietapa: pasos, operadores y valores obtenidos en cada paso	81
4.6. Desempeño de la función de transformación ϑ	84
4.7. Impactos identificados y su naturaleza	92
4.8. a) CTL de 3 términos y b) CTL de 5 términos	92
4.9. CTL de 9 términos	98
4.10. Resultados finales	99
4.11. Resultados empleando el Método de Conesa	101
4.12. a) Matriz de clasificación por el Método de Conesa y b) Matriz de clasificación por el MH-EIIA	102
4.13. Transformaciones de expresiones lingüísticas y CDD	107
4.14. Transformación del CTLDD $\{Muy\ Alto, Perfecto\}$ en S^7	111
5.1. Evaluación no dinámica de las alternativas en la Situación a).	116
5.2. Evaluación no dinámica de las alternativas en la Situación b).	117
5.3. Esquema general del MD-TDD	119
5.4. La estructura de $\oplus$ en $[-1, 1]$	123
5.5. Esquema general del MHD-EIIA	126
5.6. La evaluación de las alternativas en el MHD-EIIA	129
5.7. Comportamiento de la Importancia no Dinámica, $\mathfrak{I}_t(P_i)$, de los proyectos durante los tres años	132
5.8. Función de Combinación de Van Melle	134
5.9. Pasos para la resolución del problema	134
6.1. Arquitectura en 4-capas basada en el <i>Spring Framework</i>	140
6.2. Página principal para registrarse en el SEVIIA	145
6.3. Página principal para el Administrador	146
6.4. Formulario para añadir un nuevo usuario del SEVIIA	146
6.5. Formulario para añadir un nuevo factor ambiental	147
6.6. Formulario para añadir una nueva acción	148
6.7. Formulario para añadir un dominio numérico	148
6.8. Formulario para añadir un nuevo criterio de evaluación	149

6.9. Funcionalidades mostradas al Administrador para gestionar proyectos	149
6.10. Formulario mostrado al experto para seleccionar un proyecto a evaluar	151
6.11. Formulario mostrado al experto para la recopilación de sus preferencias	151
A.1. Representación gráfica de funciones de pertenencia	163
A.2. Definición semántica de la variable lingüística altura utilizando funciones trapezoidales	168
A.3. Definición semántica de la variable lingüística altura utilizando funciones triangulares	169
A.4. Diferentes semánticas para el concepto <i>muy alto</i>	169
A.5. Esquema de Computación con Palabras basado en la computación con percepciones	171
A.6. Esquema de Computación con Palabras basado en los procesos de transformación, manipulación y retransformación	171
A.7. Ejemplos de jerarquías lingüísticas de dos niveles	176
A.8. Expresiones lingüísticas comparativas representadas mediante CTLDD	180

Capítulo 1

Introducción

El presente capítulo constituye una introducción a la memoria de tesis doctoral titulada: *Modelos Para la Evaluación de la Importancia del Impacto Ambiental en Contextos Complejos Bajo Incertidumbre*. El capítulo comienza con una breve presentación del objeto de estudio de esta investigación y las motivaciones que la han originado. A continuación, se exponen los objetivos que nos han guiado y se explica la estructura del resto del documento.

1.1. Motivación

No todos los recursos naturales que conforman el medio ambiente son renovables, lo que demanda su protección y uso controlado en el desarrollo de los proyectos emprendidos por los seres humanos. La Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) es un procedimiento de carácter jurídico-administrativo que tiene por objetivo la identificación, predicción e interpretación de los impactos ambientales que un proyecto o una actividad produciría en caso de ser ejecutado, así como la prevención, corrección y valoración de los mismos, todo ello con el propósito de ser aceptado, modificado o rechazado por parte de las administraciones públicas [49, 113]. La EIA permite establecer si un determinado proyecto, sometido a evaluación, es o no compatible con el medio ambiente, y por lo tanto determinar si debe o no ejecutarse, así como las condiciones que deben seguirse en su ejecución, en caso de ser aceptado.

Una EIA se realiza siguiendo dos perspectivas fundamentales, o bien se basa en

la cuantificación de los impactos mediante el uso de indicadores, o bien se emplean los juicios de expertos. En esta memoria nos centraremos en el segundo tipo, llamado Evaluación de la Importancia del Impacto Ambiental (EIIA) y específicamente en la etapa en la que se valoran los impactos.

Existen diversos métodos de EIIA, pero independientemente de cuál se aplique, deben confrontar la complejidad creciente de este proceso, la cual podemos caracterizar a través de los siguientes factores:

- La multiplicidad de las alternativas a evaluar en un mismo problema, debido a que por un lado, se requiere ordenar los impactos, factores y acciones y, por otro lado, una evaluación global del proyecto, que también podrá ser utilizada para su comparación con otras alternativas de ejecución para un mismo proyecto y por tanto permitirá además obtener un orden de tales opciones.
- El carácter predictivo de la EIIA sobre la forma en que un proyecto repercutirá sobre el entorno implica que el análisis de las decisiones se realice bajo incertidumbre [15, 53, 108, 123, 154].
- La necesidad de un tratamiento preciso, es decir, sin pérdida de información, de datos de diferente naturaleza, cualitativa o cuantitativa, de acuerdo a la naturaleza de los criterios evaluados.
- La necesidad de obtener resultados interpretables por los involucrados en el proceso evaluativo, de manera que se facilite la comprensión de la EIIA y su empleo posterior como instrumento jurídico y administrativo.
- La naturaleza dinámica de los elementos del problema y con ello la necesidad de obtener resultados que tengan en cuenta los cambios en el tiempo de los impactos ambientales.

Tradicionalmente los problemas de EIIA se han resuelto aplicando métodos donde los expertos emplean únicamente escalas numéricas para valorar los impactos ambientales [16, 49, 73, 116, 128, 153], sin importar la naturaleza, cualitativa o cuantitativa de los criterios de evaluación involucrados. Esto implica que, aunque la incertidumbre es inherente a la EIIA, esta no sea modelada de forma acertada. Además, se obtienen resultados numéricos que pueden no representar el

conocimiento y la información imprecisa adecuadamente y a veces son difíciles de interpretar, lo cual ensombrece el papel de la EIIA como instrumento de apoyo a la toma de decisiones sobre la aceptación o no de un proyecto.

La relevancia de la EIIA para la protección del medio ambiente y las limitaciones de los métodos tradicionales para llevar a cabo este proceso en contextos complejos actuales, motivaron la siguiente hipótesis de partida de esta investigación:

Las limitaciones de los métodos tradicionales de EIIA no permiten modelar adecuadamente la naturaleza incierta, heterogénea y dinámica de este proceso, por lo que se obtienen resultados de baja interpretabilidad y con pérdida de información. Esto provoca que sea necesario, por una parte, flexibilizar el marco de evaluación de la EIIA, de manera que los expertos puedan expresar sus preferencias en diferentes dominios de expresión, que representen tanto la incertidumbre como la naturaleza cualitativa y cuantitativa de los criterios que se evalúan en el problema de toma de decisión; y por otra parte, mejorar el método de evaluación mediante la implementación de un modelo que permita tomar decisiones teniendo en cuenta los cambios en el tiempo de las acciones del proyecto, de los factores ambientales afectados y por tanto, de los impactos ambientales.

1.2. Objetivos

El propósito fundamental de esta investigación radica en: *Desarrollar modelos para la EIIA en contextos complejos bajo incertidumbre.* Este propósito general implica el cumplimiento de los siguientes objetivos específicos:

1. *Actualización del estado del arte sobre la EIIA basada en Análisis de Decisión.*

Para ello se analizarán en profundidad los elementos de proceso de EIIA y los métodos más representativos para desarrollarla. Esto permitirá delimitar las dificultades existentes, de manera que podamos identificar las consecuentes limitaciones que lastran la EIIA.

2. *Desarrollo de un modelo de EIIA con información heterogénea.*

Para ello debemos estudiar los diferentes dominios de información que usualmente se utilizan en problemas de toma de decisión, centrándonos en aquellos

que permiten representar la incertidumbre que puede aparecer en la EIIA, así como la naturaleza heterogénea de los criterios de evaluación. Luego analizaremos los distintos enfoques existentes para el tratamiento de esta información heterogénea y seleccionaremos el más conveniente para la EIIA. Por último, definiremos el modelo de EIIA con información heterogénea y lo aplicaremos a un problema de EIIA real para analizar los resultados y contrastar la hipótesis de partida.

3. *Desarrollo de un modelo de EIIA en contextos dinámicos.*

Este objetivo específico requiere que inicialmente analicemos la naturaleza dinámica de la EIIA en determinadas situaciones, así como las propuestas que existen en la literatura para resolver problemas de Toma de Decisión Dinámica (TDD) y valoremos si es posible implementar alguna de ellas para la EIIA. Esto nos permitirá definir el modelo de EIIA con información heterogénea en contextos dinámicos, de manera que las evaluaciones finales representen la evolución temporal de los impactos ambientales de un proyecto. Para ello, se definirán las herramientas necesarias que permitan modelar estos fenómenos. De igual forma, aplicaremos el modelo propuesto a un problema de evaluación para comprobar la hipótesis de partida.

4. *Desarrollo de un software para la EIIA que soporte el modelo de EIIA con información heterogénea.*

1.3. Estructura

Para explicar con claridad cómo se alcanzan los objetivos anteriores, la memoria está organizada en siete capítulos y tres apéndices. El contenido de cada una de estas partes se introduce brevemente a continuación.

Capítulo 2: En este capítulo inicialmente se revisan conceptos básicos, elementos fundamentales y las etapas principales en el proceso de EIIA y se describen algunos de los métodos de EIIA más representativos. En una segunda parte, se describen los problemas de toma de decisión a partir de sus características, estructura y clasificaciones. Esto nos servirá para presentar la EIIA como problema basado en el Análisis de Decisión y evaluar las principales limitaciones que presentan los métodos convencionales.

Capítulo 3: En este capítulo inicialmente se revisan diferentes enfoques para el tratamiento de información heterogénea en problemas de Análisis de Decisión y se valora cuál de ellos es el apropiado para la solución de un problema de EIIA con información heterogénea. Además, se revisan distintos modelos para la resolución de problemas de toma de decisión dinámica y se analiza cuál puede emplearse para la EIIA en contextos dinámicos.

Capítulo 4: Se propone un nuevo modelo de EIIA en contextos heterogéneos basado en el esquema general de un proceso de Análisis de Decisión. Se describe su estructura y la relación entre sus distintas etapas, así como los pasos que se realizan en cada una de ellas. Además se aplica el modelo a un problema de EIIA real para ilustrar y analizar los resultados en la implementación del modelo propuesto.

Capítulo 5: Se propone un modelo de TDD que, a partir de un coeficiente discriminativo basado en operadores de agregación bipolares y asociativos, permite diferenciar las alternativas de acuerdo a su comportamiento a lo largo de diferentes períodos. Esta propuesta se utiliza para integrar el modelado dinámico en procesos de EIIA con información heterogénea y que se ilustra sobre un problema de EIIA.

Capítulo 6: Presenta un software que soporta el modelo de EIIA en contextos heterogéneos. Para ello se explica la arquitectura, las herramientas y los lenguajes utilizados en su desarrollo así como los módulos y funcionalidades del sistema.

Capítulo 7: Este capítulo finaliza esta memoria mostrando las conclusiones y resultados más relevantes obtenidos en la investigación realizada, así como las futuras líneas de investigación a seguir. También se muestran las publicaciones obtenidas durante el desarrollo de esta investigación.

Apéndices: Se incluyen tres apéndices. Los dos primeros están dedicados a introducir el modelado lingüístico difuso de información lingüística y los operadores de agregación, debido a que ambos temas completan las revisiones presentadas en los capítulos 3 y 4 respectivamente, y mejoran la comprensión de los modelos de EIIA propuestos en los capítulos 5 y 6. En el tercer

apéndice se presentan los datos utilizados en el problema de EIIA del capítulo 4.

Consideramos importante destacar que esta investigación constituye un esfuerzo por promover la conciencia ambiental, en especial en el entorno cubano, y el papel de la ciencia en favor de la búsqueda de soluciones a la crisis medio ambiental.

Capítulo 2

Evaluación de la Importancia del Impacto Ambiental y Análisis de Decisión

El propósito de este capítulo es comprender la EIIA como problema basado en el Análisis de Decisión. Para ello, en la primera parte del capítulo revisaremos los conceptos fundamentales relacionados con la EIIA. Una vez repasada la base conceptual, nos adentraremos en una perspectiva metodológica y describiremos algunos de los métodos tradicionales de EIIA más representativos.

La EIIA sigue un esquema similar a un proceso de Análisis de Decisión donde antes de tomar una decisión se analizan las distintas alternativas del problema. Para presentar esta relación, en la segunda parte del capítulo, caracterizaremos los problemas de toma de decisión a partir de su estructura y clasificaciones según la teoría de la decisión. Luego, describiremos brevemente un esquema de resolución de un problema de toma de decisión, así como las fases que definen el proceso de Análisis de Decisión en las que se basarán nuestros modelos para EIIA. Esto nos servirá para distinguir las principales limitaciones que manifiestan las soluciones a la EIIA a través de los métodos convencionales.

2.1. Evaluación de la Importancia del Impacto Ambiental

En los últimos años, debido al aumento de los problemas ambientales, el medio ambiente ha cobrado especial reconocimiento e importancia como factor de garantía del progreso. La protección del medio ambiente constituye un factor relevante para el aseguramiento de la disponibilidad de los recursos naturales indispensables para la satisfacción de las necesidades básicas de la población y lograr un desarrollo sostenible. El crecimiento económico y la protección ambiental son elementos indisolubles y complementarios pues así como, sin una protección adecuada del medio ambiente el crecimiento se vería afectado, la protección ambiental también depende de tal crecimiento. No puede haber progreso sólido y estable si no existe una preocupación de la sociedad en su conjunto por la conservación ambiental.

La evaluación de los cambios que el desarrollo de proyectos causa en el medio ambiente, implica conocer qué es el ambiente y otros conceptos fundamentales relacionados con la EIIA, el proceso y los métodos para llevarla a cabo, así como el carácter dinámico de los impactos ambientales. En esta primera parte del capítulo revisaremos estos aspectos.

2.1.1. Conceptos Fundamentales Relacionados con la Evaluación de la Importancia del Impacto Ambiental

El medio ambiente es el entorno vital que comprende el conjunto de elementos físico-naturales, socioeconómicos, culturales y estéticos que interactúan con el individuo y con la comunidad en que vive, determinando la forma, el carácter, el comportamiento y la supervivencia de ambos [49]. Los componentes fundamentales del medio ambiente son el medio ambiente físico-natural y el medio ambiente socioeconómico. El primero está constituido por cuatro sistemas interrelacionados: el aire, el agua, el suelo y el sistema biológico o biosfera (incluye la flora y la fauna, además del hombre); mientras que el segundo, queda definido por el conjunto de infraestructuras materiales construidas por el hombre, los sistemas sociales e institucionales que ha creado y las actividades económicas en que participa. Las actividades del hombre provocan cambios o alteraciones en el medio ambiente o en

algunos de sus componentes, ya sea por la contaminación generada por las áreas urbanas y rurales, las actividades industriales, el uso de vehículos, la eliminación de desechos sólidos o por el desequilibrio ecológico causado por la construcción y operación de industrias y cualquier obra de carácter público o privado [38].

Precisamente a estos cambios o alteraciones del medio ambiente se les denomina impactos ambientales. El impacto de un proyecto sobre el medio ambiente es la diferencia existente entre la situación del medio ambiente futuro modificado (proyecto ejecutado), y la situación del medio ambiente futuro tal y como este habría evolucionado sin la realización del mismo, lo cual se conoce como alteración neta [49].

En un significado básico, el *proyecto* se define como una unidad de acción capaz de materializar algún aspecto del desarrollo económico o social [38]. Esto implica, desde el punto de vista económico, proponer la producción de algún bien o la prestación de algún servicio, con el empleo de una cierta técnica y con la intención de obtener un determinado resultado o ventaja socioeconómica. Por ejemplo, normalmente los proyectos relacionados con obras públicas ocupan un área importante del territorio, modificando sus características originales. Así, cabe señalar la incidencia en el hábitat y la movilidad de la fauna; las alteraciones en la hidrología (aguas superficiales y subterráneas), lo cual puede repercutir en la disponibilidad de los recursos hídricos y el riesgo por inundación; la estabilidad y la erosión del terreno, que pueden ser alteradas, incrementando el riesgo de deslizamientos y pérdida del suelo; el paisaje y la calidad de vida. Además las infraestructuras tienen igualmente efectos sobre las actividades económicas y la forma de vida de un determinado entorno. Por otra parte, no se debe despreciar el impacto ambiental indirecto causado por la industria asociada a la construcción, tales como la obtención de materias primas, prefabricación de elementos estructurales o no, entre otros.

Una Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) es un procedimiento jurídico-administrativo que tiene por objetivo la identificación, predicción e interpretación de los impactos ambientales que un proyecto o una actividad produciría en caso de ser ejecutado, así como la prevención, corrección y valoración de los mismos, todo ello con el propósito de ser aceptado, modificado o rechazado por parte de las administraciones públicas [49].

La EIA anticipa los futuros impactos ambientales negativos y positivos de

acciones humanas permitiendo seleccionar las alternativas que, cumpliendo con los objetivos propuestos, maximicen los beneficios y disminuyan los impactos no deseados [113]. La interacción de los factores ambientales y de las acciones del proyecto conducen a posibles impactos ambientales.

Un análisis holístico de la EIA comprende aproximaciones a este proceso desde diferentes perspectivas [38]:

- Aproximación conceptual: percibe la EIA como un proceso de análisis conducente a la formación de un juicio previo, lo más objetivo posible, acerca de la importancia que tienen los impactos generados por actividades desarrolladas por el hombre -proyectos- y las posibilidades existentes para su prevención de ocurrencia, o reducción a niveles aceptables.
- Aproximación administrativa: se enfoca la EIA como un procedimiento de carácter administrativo, que conduce a la aceptación, modificación o rechazo definitivo de un proyecto sometido a evaluación, con base en la incidencia que éste tenga en el medio. Esta visión está centrada en valorar debidamente las acciones sobre el entorno de forma que puedan encuadrarse dentro del proceso de toma de decisiones y poder decidir si la realización de un proyecto determinado es o no aceptable desde un punto de vista ambiental.
- Aproximación técnica: entiende la EIA como un proceso analítico que busca identificar (relaciones causa-efecto), predecir (cuantificar), valorar (interpretar), prevenir, y comunicar (participación pública) el impacto ambiental de un proyecto en caso de que éste sea ejecutado. Representa la herramienta fundamental para la toma de decisiones desde la esfera de la administración, y el soporte para la aproximación administrativa.

La EIA además puede estar enfocada en la identificación, cuantificación y mitigación en forma preventiva o correctiva, de los diferentes impactos de un proyecto en los casos siguientes [38]:

- A distintas alternativas de un mismo proyecto o acción.
 - A diferentes niveles de aproximación (estudios preliminares y estudios detallados).
-

- A diferentes fases de ejecución de un proyecto (preliminar, de construcción y de operación).

Otra clasificación la EIA está dada por la forma en que se lleva a cabo:

- Basada en la importancia: se utilizan los juicios u opiniones de expertos, que son agregados para emitir una valoración general de cada alternativa evaluada.
- Basada en la magnitud: se cuantifican los impactos mediante el uso de indicadores para obtener la diferencia de la calidad del medio ambiente entre las situaciones “con proyecto” y “sin proyecto”.

La importancia del impacto ambiental está estrechamente relacionada con la magnitud del impacto en sí, a pesar de que no son equivalentes. Por lo general, los juicios subjetivos se relacionan con la evaluación de la importancia, mientras que las medidas objetivas de indicadores ambientales están mayormente relacionadas con la magnitud. En esta memoria nos concentraremos en el primer tipo, llamado Evaluación de la Importancia del Impacto Ambiental (EIIA) desde una perspectiva técnica.

2.1.2. El Proceso de EIIA

El proceso de EIIA esencialmente implica las etapas que se ilustran en la Figura 2.1 aunque los diferentes modelos existentes [16, 49, 73, 116, 128, 153] modifican esta estructura general según los objetivos y regulaciones legales a que respondan en cada caso. A continuación se describen estas etapas [49]:

1. Análisis del Proyecto:

En esta etapa se estudian los objetivos del proyecto, su alcance y duración, aunque también se incluyen otros elementos como el historial de la entidad promotora y la cartografía detallada de la localización del proyecto. Permite identificar las acciones que componen el proyecto, obra o actividad, que pueden estar jerarquizadas según las etapas en que se desarrollarán. Se entiende por acción, la parte activa que interviene en la relación causa-efecto que define un impacto ambiental. Como se muestra en la Figura 2.2, se suele subdividir el proyecto en forma de árbol con varios niveles, el último de los



```

graph TD
    Proyecto[Proyecto] --> Situación[Situación]
    Proyecto --> Fase[Fase]
    Situación --> Fase
    Situación --> Actividad[Actividad]
    Fase --> Actividad
    Fase --> Acción[Acción]
    Actividad --> Acción
    
```

Las acciones que se identifiquen deben ser concretas y:

- a) Relevantes: han de ajustarse a la realidad del proyecto y ser capaces de desencadenar efectos notables.
- b) Excluyentes/independientes: para evitar solapamientos que puedan dar lugar a duplicaciones en la contabilidad de los impactos.

- c) Fácilmente identificables: susceptibles de una definición nítida y de una identificación fácil sobre planos o diagramas de proceso.
- d) Localizables: atribuibles a una zona o punto concreto del espacio en que se ubica el proyecto.
- e) Cuantificables: en la medida de lo posible, deben ser medibles en magnitudes físicas.

Para confeccionar el árbol de acciones se pueden emplear las siguientes técnicas:

- Cuestionarios generales o específicos para diversos tipos de proyectos.
- Consulta a paneles de expertos y entrevistas en profundidad con personas y agentes de distintos intereses y sensibilidad ante el proyecto.
- Escenarios comparados.
- Matrices, modelos de flujo y grafos genéricos preexistentes de relación causa-efecto.

2. Inventario medioambiental o caracterización del entorno del Proyecto:

El objetivo de esta etapa es la delimitación espacial de la porción de medio ambiente afectada por el proyecto para describir el medioambiente como un conjunto de factores medioambientales. Pero esta delimitación geográfica es difícil, pudiendo variar extraordinariamente para los diferentes factores estudiados. Por ejemplo, para una construcción concreta, el entorno puede ser fácilmente delimitado de acuerdo a la ocupación del suelo. Sin embargo, los efectos de la contaminación atmosférica sobre los acuíferos subterráneos no pueden ubicarse espacialmente de forma precisa. No se trata simplemente de una delimitación del ámbito geográfico del estudio sino de la identificación de los factores afectados y el área de influencia para cada factor. Como se muestra en la Figura 2.3, se suele desagregar el entorno en forma de árbol con varios niveles, el último de los cuales representará los factores ambientales.

Los factores que se identifiquen como relevantes deben ser portadores de información importante sobre el estado y funcionamiento del medio y resumir

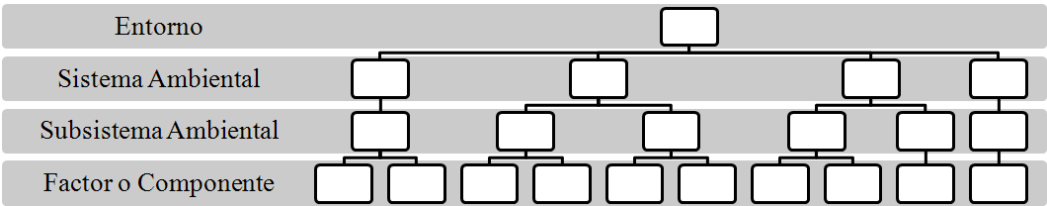


Figura 2.3: Jerarquía de factores del Entorno

el resto de las condiciones mencionadas para las acciones. La identificación de factores relevantes y su organización en forma de árbol se facilita progresando por aproximaciones sucesivas y haciendo uso de los mismos instrumentos mencionados para identificar las acciones del proyecto.

3. Identificación de impactos potenciales:

Una vez conocido el *proyecto*, el *entorno* que le rodea y la capacidad de acogida del primero sobre el segundo, es necesario identificar los posibles impactos. Se trata de una primera visión de la relación proyecto-entorno que nos proporcionará una percepción inicial de aquellos efectos que pueden resultar más sintomáticos debido a su importancia para el entorno.

Existen numerosas técnicas para identificar impactos potenciales; entre ellas, los cuestionarios generales o específicos, los escenarios comparados, es decir, observación de las situaciones donde se ha realizado una experiencia similar a la que se evalúa, las entrevistas en profundidad con expertos en el proyecto/actividad y en el entorno, la consulta a paneles de expertos, representativos del conjunto de los grupos de interés social afectados por el proyecto; además de las matrices sucesivas o escalonadas, matrices cruzadas o de acción recíproca, grafos o redes de relación causa-efecto, técnicas de superposición y la simulación cualitativa de interacciones.

Por otra parte, los impactos pueden clasificarse, entre otros criterios, según las interacciones entre el tipo y localización de las acciones y las funciones del entorno en que se ubican; y según su persistencia en el tiempo, tal y como veremos en el apartado 2.1.4.2.

4. Evaluación de la Importancia:

En esta etapa descansa la esencia de una EIIA, siendo su parte central y definitiva. En ella concretamente, se valoran los impactos y se obtiene información que es agregada para comparar y seleccionar la mejor alternativa. Por ser esta etapa el centro de atención de nuestra memoria, nos referiremos más adelante y con mayor detenimiento, a los métodos para desarrollarla.

5. Medidas correctoras:

Para prevenir el impacto ambiental se introducen medidas correctoras que consisten en modificaciones de localización, tecnología, tamaño, diseño, materiales que se hacen a las previsiones del proyecto o cuando se incorporan elementos nuevos. Los objetivos de estas medidas están encaminados a hacer más leve o evitar el efecto de un proyecto en el medio ambiente y aprovechar las oportunidades que da el medio para mejor éxito del proyecto. Conviene que las medidas correctoras sean incluidas en el propio proyecto, como nuevas unidades de obra y con su correspondiente partida presupuestaria. Según su carácter, las medidas correctoras podrán ser [49]:

- Protectoras: protegen, por ejemplo, ecosistemas, paisajes, evitando impactos que pudieran afectarles.
- Correctoras: corrigen el proyecto para conseguir una adecuada integración ambiental.
- Curativas: prevén la intervención sobre ciertos impactos una vez producidos.
- Potenciativas: favorecen procesos naturales de regeneración.
- Compensatorias: se refieren a impactos negativos inevitables, por lo que sólo pueden ser compensados por otros efectos de signo positivo.

6. Participación pública:

La participación de la comunidad o participación ciudadana es esencial dentro de la evaluación ambiental, porque permite que las personas se informen y opinen responsablemente acerca del proyecto. No sólo los ciudadanos pueden aportar información relevante a la EIIA sino que además su implicación concede transparencia a la revisión de los estudios y solidez a la decisión final. Esta etapa debe funcionar como mecanismo de control social sobre el proceso de EIIA.

7. Informe Final:

Se trata de un resumen ejecutivo de todo el proceso en el que se recopilan todos los análisis de las fases anteriores. Se convierte en un documento de síntesis que resume las conclusiones más importantes encontradas en el desarrollo del proceso.

8. Declaración del impacto ambiental:

En esta etapa se refleja la decisión de la administración pública sobre la autorización o no de ejecutar el proyecto. La autoridad ambiental toma la decisión de otorgar una licencia ambiental para el solicitante.

Como se explicó en la Introducción de esta memoria, nuestro interés se centra en la etapa de *Evaluación de la Importancia* porque convierte la información de las etapas anteriores y preferencias subjetivas de los expertos, en valores de importancia para apoyar las decisiones sobre la pertinencia de los proyectos y la prevención o reducción del impacto desfavorable. La EIIA debe presentar la realidad objetiva, para conocer en qué medida repercutirá sobre el entorno la puesta en marcha de un proyecto, obra o actividad [49]. En adelante, EIIA se refiere específicamente a esta etapa. A continuación describiremos algunos de los métodos convencionales para la EIIA.

2.1.3. Métodos Tradicionales de EIIA

El acelerado deterioro ambiental en las últimas décadas, ha conducido a la adopción de múltiples métodos para la evaluación de los impactos ambientales que un determinado proyecto puede causar sobre el ambiente en caso de ser ejecutado. Específicamente para la EIIA, los métodos más utilizados son los de tipo matricial debido a su relativa simplicidad [16, 188]. A continuación se describen algunas de las propuestas más representativas de este tipo de métodos:

2.1.3.1. Matriz de Leopold

Esta matriz de interacción elemento-actividad (véase la Figura 2.4) fue desarrollada en el Geographical Survey, de Estados Unidos por un colectivo de autores [116] liderado por Luna Leopold y de ahí su nombre. El procedimiento propuesto incluye los siguientes pasos:

1. Declaración de objetivo del proyecto.
2. Posibilidades tecnológicas para lograr el objetivo.
3. Acciones propuestas y alternativas.
4. Informe de caracterización ambiental para iniciar las acciones.
5. Planes de ingeniería alternativos.
6. Identificación de impactos y análisis de magnitud e importancia.
7. Evaluación del impacto.
8. Recomendaciones.

Instrucciones				Acciones propuestas					
				Grupo 1		Grupo...		Grupo...	
				Acción 1	Acción...	Acción...	Acción...	Acción...	Acción n
Características y Condiciones del Ambiente	Características	Grupo1	Elemento1						
			Elemento...						
		Grupo...	Elemento...						
			Elemento...						
	Condiciones	Grupo...	Elemento...						
			Elemento...						
		Grupo...	Elemento...						
			Elemento...						
	Factores culturales	Grupo...	Elemento...						
			Elemento...						
		Grupo...	Elemento...						
			Elemento...						
	Relaciones ecológicas	Grupo...	Elemento...						
			Elemento...						
		Grupo...	Elemento m						

Figura 2.4: Matriz de Leopold

La matriz queda conformada en el paso 6 y comprende en el eje horizontal 100 acciones que pueden causar cambios ambientales y en el eje vertical 88 características ambientales que pueden ser afectadas, existiendo un potencial de 8800 impactos en total. El principio básico del método consiste, en señalar inicialmente todas las posibles interacciones entre las acciones y los factores; para luego establecer la magnitud e importancia de cada impacto asignando para cada uno de

estos criterios un valor en una escala que varía de 1 a 10 (donde 10 representa una gran magnitud o importancia). Además los impactos beneficiosos y adversos se identifican mediante el uso de los signos (+) y (−) respectivamente [116]. De esta forma se obtiene una matriz como la representada en la Figura 2.4.

Una vez construida y completada la matriz, se redacta un documento de revisión y evaluación en el que se destacan dos elementos principales: las filas y columnas con mayor cantidad de interacciones (lo cual corresponde a los factores más afectados y a las acciones de mayores efectos); y las celdas con los valores más altos.

2.1.3.2. Método de Conesa

Vicente Conesa propone una metodología general para llevar a cabo todo el proceso de EIA, que incluye una valoración cualitativa derivada de la matriz de Leopold [116] y una valoración cuantitativa basada en la metodología del Instituto Battelle-Columbus [111]. Este es un método ampliamente utilizado para la EIHA en Europa y América Latina y especialmente en Cuba. Algunos autores consideran incluso la existencia de una matriz general cualitativa [15, 61, 188] basada en la propuesta de Conesa. En esta memoria nos concentraremos en analizar los dos pasos que, en la valoración cualitativa, permiten realizar una EIHA y que pueden resumirse de la siguiente forma:

1. Valoración cualitativa del impacto.

Una vez que han sido identificadas las acciones del proyecto y los factores ambientales susceptibles de ser impactados, se procede al análisis de las interacciones medio-acción, que dará como resultado la identificación de los impactos. Esta valoración cualitativa se realiza a partir de una matriz de doble entrada donde cada casilla de cruce en la matriz ofrece una idea del efecto de cada acción impactante sobre cada factor ambiental.

La importancia de cada impacto, que se registra en cada cruce de una matriz como la que se muestra en la Figura 2.5, es determinada de manera cualitativa a través de la ecuación:

$$I = \pm(3IN + 2EX + MO + PE + RV + SY + AC + EF + PR + RC), \quad (2.1)$$

Matriz de impactos			Acciones propuestas					
			Fase 1		Fase...		Fase...	
			Acción 1	Acción...	Acción...	Acción...	Acción...	Acción n
Medio Físico	Medio Inerte	Factor 1						
		Factor...						
	Biótico	Factor...						
		Factor...						
	Perceptual	Factor...						
		Factor...						
Medio socioeconómico y cultural	Territorial	Factor...						
		Factor...						
	Núcleos habitados	Factor...						
		Factor...						
	Sociocultural	Factor...						
		Factor...						
	Económico	Factor...						
		Factor m						

$$I = \pm (3IN + 2EX + MO + PE + RV + SY + AC + EF + PR + RC)$$

Figura 2.5: Matriz de Conesa

donde los criterios utilizados para el cálculo de la importancia del impacto corresponden con las siguientes definiciones:

- Signo o Naturaleza.

Hace alusión al carácter beneficioso (+) o perjudicial (-) de las acciones que van a interactuar con los distintos factores ambientales.

- Intensidad (IN).

Grado de incidencia de la acción sobre el factor, en el ámbito específico que actúa. El impacto de una acción sobre el medio puede ser “directo” o “indirecto”, es decir se produce como consecuencia del efecto primario el que, por tanto, devendría en causal de segundo orden. A los efectos de la ponderación del valor se considera:

Baja	1
Media	2
Alta	4
Muy alta	8
Total	12

- Extensión (EX).

Área de influencia teórica del impacto en relación con el entorno del proyecto, expresado en relación al porcentaje del área de influencia, en que se manifiesta el impacto. La extensión se valora de la siguiente manera:

Puntual	1
Parcial	2
Extenso	4
Total	8
Crítico	+4

Si el lugar del impacto puede ser considerado un *lugar crítico* (alteración del paisaje en zona valorada por su valor escénico, o vertido aguas arriba de una toma de agua), al valor obtenido se le adicionan cuatro unidades. Si en el caso de un impacto *crítico* no se pueden tomar medidas correctoras, se deberá cambiar la ubicación de la actividad que, en el marco del proyecto, da lugar al efecto considerado.

■ Momento (MO).

Tiempo que transcurre entre la aparición de la acción y el comienzo del efecto sobre el factor considerado. El momento se valora de la siguiente manera:

	Crítico	+4
Inmediato (menos de un año)	4	
Mediano plazo (1 a 5 años)	2	
Largo plazo (más de 5 años)	1	

■ Persistencia (PE).

Tiempo supuesto de permanencia del efecto desde su aparición y, a partir del cual el factor ambiental afectado retornaría a las condiciones iniciales previas a la acción por medios naturales, o mediante la introducción de medidas correctoras. Un efecto considerado permanente puede ser reversible cuando finaliza la acción causal (caso de vertidos de contaminantes) o irreversible (caso de afectar el valor escénico en zonas de importancia turística o urbanas a través de la alteración de geoformas o por la tala de un bosque). En otros casos los efectos pueden ser temporales. Los impactos se valoran de la siguiente manera:

	Fugaz	1
	Temporal (entre 1 y 10 años)	2
	Permanente (duración mayor a 10 años)	4

■ Reversibilidad (RV).

Posibilidad de retorno en el tiempo del factor ambiental por medios naturales a las condiciones que tenía antes de la ocurrencia de la acción. Se considera únicamente aquella recuperación realizada en forma natural después de que la acción ha finalizado. Cuando un efecto es reversible, después de transcurrido el tiempo de permanencia, el factor retornará a la condición inicial. Se asignan los siguientes valores:

Corto plazo (menos de un año)	1
Mediano plazo (1 a 5 años)	2
Irreversible (más de 10 años)	4

■ Recuperabilidad (RB).

Posibilidad de reconstrucción, total o parcial, del factor afectado como consecuencia del proyecto, es decir, la posibilidad de retornar a la condiciones iniciales previas a la actuación, por medio de la intervención humana (introducción de medidas correctoras). Se valora de la siguiente manera:

Si la recuperación puede ser total e inmediata	1
Si la recuperación puede ser total a mediano plazo	2
Si la recuperación puede ser parcial (mitigación)	4
Si es irrecuperable	8

■ Sinergia (SI).

Este atributo contempla el refuerzo de dos o más impactos simples. Se le otorgan los siguientes valores:

Si la acción no es sinérgica sobre un factor	1
Si presenta un sinergismo moderado	2
Si es altamente sinérgico	4

Si en lugar de sinergismo se produce debilitamiento, el valor considerado se presenta como negativo.

■ Acumulación (AC).

Este atributo mide el incremento de la manifestación de un impacto cuando persiste reiteradamente la acción que lo genera. La asignación de valores se efectúa considerando:

No existen efectos acumulativos 1

Existen efectos acumulativos 4

■ Efecto (EF).

Se refiere a la relación causa efecto o forma la manifestación del efecto sobre un factor como consecuencia de una acción. Si el efecto es indirecto, su manifestación no es consecuencia directa de la acción, sino que tiene lugar a partir de un impacto directo, actuando éste como una acción de segundo orden. A los efectos de la ponderación se considera:

Efecto secundario 1

Efecto directo 4

■ Periodicidad (PR).

Este atributo se refiere a la regularidad de manifestación del impacto, bien sea de manera cíclica o recurrente (impacto periódico), de forma impredecible en el tiempo (impacto irregular), o constante (impacto continuo). Se le asigna los siguientes valores:

Si los efectos son continuos 4

Si los efectos son periódicos 2

Si son discontinuos 1

La importancia del impacto se calcula con los valores asignados a los criterios anteriores y los valores que se obtienen varían entre 13 y 100. De acuerdo a esta calificación el impacto se cataloga como:

- Irrelevante ($I < 25$).
- Moderado ($25 < I < 50$).
- Severo ($50 < I < 75$).
- Crítico ($I > 75$).

2. Valoración Cualitativa de las acciones y los factores ambientales.

En esta etapa se lleva a cabo una valoración cualitativa de cada una de las acciones que han sido causa de impacto y a su vez de los factores que han sido impactados [49]. Para ello se siguen los siguientes pasos:

a) Ponderación de los factores ambientales:

Los factores ambientales presentan importancias distintas, en cuanto mayor o menor sea su contribución a la situación ambiental. Considerando que cada factor representa sólo una parte del ambiente, es importante disponer de un mecanismo según el cual todos se puedan analizar en conjunto para tener una dimensión de la situación general. Por este motivo, para cada factor ambiental se establece una medida de importancia relativa al entorno, expresada en Unidades de Importancia (UIP); la asignación de los valores de UIP se puede hacer teniendo en cuenta el criterio del grupo que desarrolla la EIIA, valores estandarizados como los del sistema de ponderación de la metodología de Battelle o mediante consulta a expertos. En la determinación de los factores ambientales y la asignación de las UIP, deben tenerse en cuenta que la suma de las importancias de los factores debe ser 1000, 100 o 1 [49].

b) Valoración de importancias totales:

La importancia total de los efectos causados en los distintos componentes y subsistemas presentes en la matriz de impactos se calcula como la suma ponderada por columnas de los efectos de cada una de los elementos tipo correspondientes a los componentes y subsistemas estudiados, así se pueden determinar los siguientes tipos de importancia:

- 1) Importancia total de los impactos generados por la acción i .
- 2) Importancia total ponderada de los impactos generados por la acción i .
- 3) Importancia total de los impactos generados a cada factor ambiental j .
- 4) Importancia total ponderada de los impactos generados por la acción i .
- 5) Importancia total de los impactos generados.
- 6) Importancia total ponderada de los impactos generados.

Este método ha sido objeto de múltiples variaciones y mejoras entre las que se destaca la propuesta de Blanco et al. [15] quienes con el fin de mejorar la objetividad de la asignación de los rangos de calificación de los impactos, incorporaron

el análisis mediante técnicas difusas, al representar todas las variables que se utilizan en el proceso como variables lingüísticas [230, 231, 232, 233] caracterizadas por números difusos. De este modo se determinan las importancias difusas de los impactos y se generan otros indicadores difusos análogos a los propuestos por Conesa.

2.1.3.3. Método de Bojórquez

Este método fue propuesto por Bojórquez, Ezcurra y García en [16]. De forma similar al Método de Conesa, antes de comenzar a evaluar los impactos, se tendrá una matriz cruzada incluyendo las actividades del proyecto, los factores ambientales y las interacciones entre estos. Los autores clasifican los criterios para caracterizar los impactos en 2 tipos:

1. Criterios básicos. Son aquellos que definen una interacción, no pueden faltar en la descripción de un impacto puesto que deben existir para que el impacto exista. Nunca toman valor nulo, por tanto, al menos deben tomar valor 1:
 - a) Intensidad (M).
 - b) Extensión (E).
 - c) Duración (D).
2. Criterios complementarios. Son aquellos que complementan la descripción de una interacción y que por tanto no son indispensables en ella. Así, podrán tomar valor 0:
 - a) Sinergia (S).
 - b) Acumulación (A).
 - c) Controversia (C).

Cada criterio es evaluado utilizando una escala ordinal compuesta por los siguientes valores: nulo (0), de nulo a bajo (1), muy bajo (2), bajo (3), de bajo a moderado (4), moderado (5), de moderado a alto (6), alto (7), muy alto (8), extremadamente alto (9).

Para evaluar el comportamiento que podría tener cada afectación se calculan dos índices, llamados Básico y Complementario que a su vez se utilizarán para

calcular la Importancia también en forma de índice, utilizando las siguientes ecuaciones:

- Índice Básico

$$MED = \frac{M + E + D}{27} \quad (2.2)$$

- Índice Complementario

$$SAC = \frac{S + A + C}{27} \quad (2.3)$$

- Importancia del impacto

$$I = MED^{(1-SAC)} \quad (2.4)$$

Factores	Acciones	<i>M</i>	<i>E</i>	<i>D</i>	<i>S</i>	<i>A</i>	<i>C</i>	<i>I</i>
Factor 1	Acción1							
Factor 1	Acción 2							
Factor 1	Acción...							
Factor 1	Acción n							
Factor...	Acción...							
Factor...	Acción...							
Factor...	Acción...							
Factor...	Acción...							
Factor...	Acción...							
Factor m	Acción1							
Factor m	Acción 2							
Factor m	Acción...							
Factor m	Acción n							

$$I = \left(\frac{M+E+D}{27} \right)^{\left(1 - \frac{S+A+C}{27} \right)}$$

Figura 2.6: Matriz de Bojórquez

Una vez calculada la importancia del impacto y completada la matriz de la Figura 2.6, los valores finales de importancia se clasifican utilizando una escala similar a la de Conesa:

- Bajo ($I < 0.25$).
- Moderado ($0.25 < I < 0.49$).
- Alto ($0.50 < I < 0.74$).
- Muy Alto ($I > 0.75$).

2.1.4. Clasificación de Impactos Ambientales

Aunque en dependencia de un determinado criterio, los impactos podrán clasificarse en diferentes tipos, en este epígrafe nos referiremos a dos tipos fundamentales: (1) los tipos de impacto según las interacciones entre el tipo y localización de las acciones causantes del impacto y las funciones del entorno en que se ubican; y (2) los tipos de impacto según su persistencia en el tiempo. Dedicaremos mayor énfasis a esta última tipología debido a la importancia que tiene para comprender la necesidad de un modelado dinámico ante ciertas situaciones en la EIIA.

2.1.4.1. La Interacción Acción-Función del Entorno

Según este criterio, se tiene una clasificación en tres grandes bloques: los que se derivan de la extracción de recursos naturales y materias primas, los que se producen por ocupación y transformación del espacio, y los que resultan de la emisión de efluentes. A estos se añaden los denominados impactos de la pasividad, consecuencia del abandono de actividades tradicionales por parte del hombre o de la no intervención, y los impactos positivos producidos cuando la acción humana se integra cuidadosamente en el medio. Asimismo, se añaden los derivados de la presencia del proyecto conjunto.

1. Impactos de sobreexplotación.

Se asocian a aquellas actividades que utilizan recursos ambientales y no respetan los criterios de sostenibilidad que se describieron; por lo tanto se pueden ordenar del siguiente modo:

- Sobreexplotación de recursos naturales renovables que se produce cuando se extraen del medio o de un ecosistema, bienes o servicios por encima de las tasas de renovación.
 - Extracción de recursos naturales no renovables que se consumen cuando se utilizan a un ritmo tal que:
 - Se agotan antes de que aparezca un suceso.
 - No permite la adaptación del medio a las modificaciones que introduce la explotación.
 - No permite una gestión racional de la explotación.
-

- Utilización de recursos no renovables que no se consumen cuando se utilizan por encima de una cierta intensidad de uso.

2. Impactos de ocupación/transformación del espacio y/o cambio en los usos del suelo.

Se generan cuando existe una discordancia entre la vocación de los ecosistemas, y del territorio en general, con la naturaleza y localización de las actividades humanas; suelen ser muy evidentes y de carácter irreversible, al estar determinados por elementos o transformaciones físicas.

3. Impactos de contaminación.

Se producen por fenómenos de contaminación que implican, primero, la emisión de materiales o energía por una actividad, luego, su dispersión y transformación en el vector soporte y, finalmente, unas consecuencias sobre el hombre, los ecosistemas, la biocenosis o los bienes materiales; el responsable directo del impacto es el nivel de inmisión y su manifestación en los efectos citados.

4. Impacto derivado del declive o ausencia de actividad.

Surgen por declive o ausencia de la intervención humana; se distinguen dos tipos:

- Subexplotación de recursos o ecosistemas. El impacto surge por defecto de actividad, es decir por falta de gestión y cuidado que requiere la explotación de los recursos que tradicionalmente se viene haciendo.
- Impacto de la pasividad. Se aplica esta idea a la falta de intervención ante situaciones que propician impactos ambientales o ante degradaciones, provocadas por fenómenos naturales o por situaciones artificiales, que se autoalimentan si no se interviene.

5. Impactos positivos.

La gestión ambiental ha de contemplar la posibilidad de generar impactos positivos, que se ha de considerar como uno de los principales criterios de calidad de la obra civil; se traduce en prestigio y eficacia productiva.

2.1.4.2. La Persistencia en el Tiempo de los Impactos Ambientales

La EIHA como procedimiento jurídico-administrativo de predicción de impactos, es usualmente empleada antes de que los proyectos sean puestos en marcha. Sin embargo, la evaluación de los impactos ambientales puede llevarse a cabo no sólo anticipadamente sino que durante la ejecución de las obras, los métodos de EIHA suelen ser nuevamente utilizados para:

- Valorar el estado del proyecto en determinado momento. En proyectos de larga duración, la incertidumbre es mayor y una única predicción no sería adecuada.
- Valorar el efecto de las medidas correctoras y preventivas. La ejecución de los planes de monitoreo suponen revisiones periódicas de la actuación ambiental y sus resultados.

Para entender el concepto de impacto ambiental, resulta útil distinguir lo que es la alteración en sí de un factor -efecto-, de la interpretación de dicha alteración en términos ambientales y, en última instancia, de salud y bienestar humano; este significado ambiental es lo que define más propiamente el impacto ambiental. Un ejemplo de fácil comprensión puede estar en el significado de cortar un árbol: si se corta un olmo de una olmeda el impacto se absorbe fácilmente por el ecosistema, éste utiliza su homeostasia para contrarrestar el efecto y al poco tiempo habrá cubierto el hueco con otro árbol o con el crecimiento de los vecinos, pero si el olmo cortado es uno milenario de un lugar emblemático, el impacto será importante y probablemente percibido como inaceptable por la comunidad. Este ejemplo no es específico para este factor sino que puede ser generalizado a cualquier factor ambiental, a pesar de las diferencias de unos factores a otros, en la relación entre la magnitud del factor alterado, o del indicador con que se mida.

A partir del análisis anterior, emerge un nuevo elemento que justifica el carácter cambiante del impacto ambiental en el tiempo [49], es decir su carácter dinámico. El significado ambiental de una alteración varía en el tiempo porque, por una parte, *varía la propia alteración*, y por otra parte porque *la percepción social varía* también. En la medida en que se progresa en el nivel de renta, aumenta la exigencia social de calidad ambiental y la curva de valor se desplaza en el sentido de dicha exigencia.

Por otro lado, la percepción es diferente para situaciones y culturas distintas. Esto tiene grandes repercusiones en la valoración de los impactos y en la prioridad con que se debe intervenir para prevenirlos o evitarlos. La acción humana responsable del impacto, el entorno afectado por ella y el conjunto formado por ambos elementos, tienen carácter de sistema.

Como explica Conesa en [49] los impactos de un proyecto o actividad en marcha deben entenderse como una cadena de relaciones complejas que se van sucediendo en el tiempo. Toda modificación de los elementos o de los procesos evoluciona hacia un nuevo equilibrio que paulatinamente, si no se ha superado la homeostasia del sistema, se va acercando al equilibrio inicial.

Un impacto simple, determinado por una relación simple acción-factor, se manifiesta en, y a partir de, un momento dado, y evoluciona con el tiempo, en sentido positivo o negativo. El impacto de una actividad o actuación humana está muy vinculado al ritmo al que se desarrolla. En términos generales un ritmo lento produce menos impactos.

De esta forma por su persistencia en el tiempo, los impactos se clasifican como [49]:

- **Impacto Temporal:** Se caracterizan por efectos que suponen alteración no permanente en el tiempo, con un plazo temporal de manifestación que puede determinarse. Existen entonces impactos fugaces, temporales y persistentes, según la duración del efecto. Por ejemplo, una repoblación forestal por terrazas que en su momento inicial produce un gran impacto paisajístico que va desapareciendo a medida que la vegetación va creciendo y cubriendo los desmontes.
 - **Impacto Permanente:** Se caracterizan por efectos que suponen una alteración, indefinida en el tiempo, de los factores, relaciones ecológicas o ambientales presentes en un lugar. Es decir, aquel impacto que permanece en el tiempo. Los impactos con una duración de la manifestación del efecto superior a 10 años son generalmente aceptados como permanentes, por ejemplo, la construcción de carreteras o de conducciones para agua de riego.
 - **Impacto Discontinuo:** Se caracterizan por efectos que se manifiestan a través de alteraciones irregulares en su permanencia. Las industrias poco contami-
-

nantes que eventualmente desprendan sustancias de mayor poder contaminante, pueden ser un ejemplo ilustrativo.

- **Impacto Periódico:** Se caracterizan por efectos que se manifiestan con un modo de acción intermitente y continua en el tiempo, por ejemplo un fuerte incremento de los incendios forestales en la estación veraniega.
- **Impacto de Aparición Irregular:** Su efecto se manifiesta de forma imprevisible en el tiempo y es preciso evaluar las alteraciones que ocasiona en función de una probabilidad de ocurrencia, sobre todo en aquellas circunstancias no periódicas ni continuas, pero de gravedad excepcional.

2.2. EIIA Basada en Análisis de Decisión

En un sentido amplio, tomar una decisión consiste en elegir la mejor opción o alternativa entre un conjunto de opciones o alternativas posibles. Los problemas de toma de decisión presentan los siguientes elementos básicos [43]:

1. Uno o varios objetivos por alcanzar.
2. Un conjunto de alternativas o decisiones posibles para alcanzar dichos objetivos.
3. Un conjunto de factores o estados de la naturaleza que definen el contexto en el que se plantea el problema de decisión.
4. Un conjunto de valores de utilidad o consecuencias asociados a los pares formados por cada alternativa y estado de la naturaleza.

En las siguientes secciones, describiremos distintas características y clasificaciones de los problemas de toma de decisión según la Teoría de la Decisión y veremos de forma breve un esquema básico de resolución de un problema de decisión. Estos elementos nos permitirán presentar posteriormente la EIIA como un problema basado en Análisis de Decisión.

2.2.1. Caracterización de los Problemas de Toma de Decisión

Dependiendo de las características de los elementos del problema de decisión, éstos podrán clasificarse siguiendo diferentes puntos de vista. Además, el tipo de

información que define el marco del problema y su modelado influirán también en el modelo de resolución del problema de decisión.

Ante la gran variedad de situaciones o problemas de decisión que se pueden presentar en la vida real, la teoría de la decisión [43, 192] ha establecido una serie de criterios que permiten clasificar los problemas de decisión atendiendo a diferentes puntos de vista:

1. Según el ambiente de decisión en el que se han de tomar las decisiones.
2. Según el número de criterios o atributos que se han de valorar en la toma de decisión.
3. Según el número de expertos que participan en el proceso de decisión.
4. Según la consideración o no, de los cambios en el tiempo de los elementos del problema.
5. Según la cantidad de dominios empleados para expresar las preferencias.

La descripción de cada punto de vista de dicha clasificación se muestra a continuación.

1. **Ambiente de Decisión**

El ambiente de decisión viene definido por las características y el marco en el que se va a llevar a cabo la toma de decisión. La teoría clásica de la decisión distingue tres situaciones o ambientes de decisión [192]:

- a) Ambiente de certidumbre. Un problema de decisión está definido en un ambiente de certidumbre cuando son conocidos con exactitud todos los elementos o factores que intervienen en el problema. Esta situación permite asignar valores cuantitativos de utilidad a cada una de las alternativas presentes en el problema.
 - b) Ambiente de riesgo. Un problema de decisión está definido en un ambiente de riesgo cuando alguno de los elementos o factores que intervienen están sujetos a las leyes del azar. En estos casos, los problemas pueden ser resueltos utilizando la teoría de la probabilidad.
-

- c) Ambiente de incertidumbre. Un problema de decisión está definido en un ambiente de incertidumbre cuando la información disponible sobre las distintas alternativas puede ser incompleta, vaga o imprecisa, lo que implica que la utilidad asignada a cada alternativa tenga que ser valorada de forma cualitativa. Esta incertidumbre surge a raíz del intento de modelar la imprecisión propia del comportamiento humano o la inherente a ciertos fenómenos que por su naturaleza son inciertos.

Diferentes problemas de toma de decisión han sido tradicionalmente tratados, bien con enfoques determinísticos o probabilísticos. El primero ignora completamente la incertidumbre, mientras que el segundo asume que cualquier incertidumbre puede ser representada como una distribución de probabilidad. Sin embargo, en problemas reales, las decisiones han de tomarse bajo situaciones con información vaga, imprecisa e incierta. Habitualmente, la incertidumbre es de naturaleza no probabilística como, por ejemplo, la que puede surgir al intentar valorar fenómenos relacionados con las evaluaciones subjetivas del impacto ambiental de un determinado proyecto. Esto ha generado la necesidad de recurrir a la definición de herramientas para tratar este tipo de incertidumbre, entre las cuales se encuentran la teoría de los conjuntos difusos [62], rough sets [63, 76], conjuntos difusos intuicionistas [5, 29, 30, 31, 207], entre otros. *La Lógica Difusa y el Enfoque Lingüístico Difuso [231, 232, 233] serán las herramientas que utilizaremos en esta investigación para el tratamiento de este tipo de incertidumbre en la EIIA, ya que el uso de la información lingüística hace más flexibles y fiables los modelos de decisión bajo incertidumbre.* Ambas herramientas se introducen en el Apéndice A de esta memoria de investigación.

2. Número de Criterios

El número de criterios o atributos que se tienen en cuenta en los procesos de decisión para obtener la solución permite clasificar a los problemas de decisión en dos tipos [45, 46, 100, 129, 156]:

- a) Problemas con un sólo criterio o atributo. Problemas de decisión en los que, para evaluar las alternativas, se tiene en cuenta un único criterio o atributo que representa la valoración dada a esa alternativa. La solución
-

se obtiene como la alternativa que mejor resuelve el problema teniendo en cuenta este único criterio. Sea $X = \{x_i | i \in (1, \dots, m)\}$ el conjunto de alternativas del problema, cada una de ellas tendrá una valoración y_i , en un dominio de expresión determinado (numérico, lingüístico y otros).

- b) Problemas multicriterio o multiatributo. Problemas de decisión en los que, para evaluar las alternativas, se tienen en cuenta dos o más criterios o atributos que definen cada alternativa. La alternativa solución será aquella que mejor resuelva el problema considerando todos estos criterios o atributos. El número de criterios en un problema de decisión multicriterio se asume que es finito. Sean $X = \{x_i | i \in (1, \dots, m)\}$ y $C = \{c_j | j \in (1, \dots, n)\}$ el conjunto de alternativas y el conjunto de criterios respectivamente, que caracterizan una situación de decisión; para cada alternativa x_i , se tendrá una valoración, y_{ij} , que indica la preferencia de la alternativa, x_i , respecto del criterio, c_j .

Los problemas de Toma de Decisión Multi-Criterio (TDMC) [98, 156, 192] son más complejos de resolver que los problemas en los que hay un solo criterio. Cada criterio puede establecer un orden particular y diferente sobre el conjunto de alternativas. A partir del conjunto de órdenes de preferencia particulares, será necesario establecer algún mecanismo que permita construir un orden global de preferencia. En la literatura, podemos encontrar varios ejemplos [169, 192].

Como ha destacado Conesa, la EIIA es un instrumento de conocimiento al servicio de la decisión [49]. En las décadas recientes se ha visto un marcado crecimiento del interés en la aplicación de la TDMC en el apoyo a las decisiones y la mejora de la EIIA debido a que hace el proceso de toma de decisiones más transparente y la información manejable por todos los participantes [17, 106, 173]. En la descripción de los métodos tradicionales de EIIA, hemos podido reconocer que es común emplear en estos problemas la interacción de diversos criterios, debido a que es difícil caracterizar la complejidad de los impactos ambientales a través de un único criterio de evaluación, *por lo que en esta memoria modelaremos la EIIA como un problema de TDMC*.

3. Número de Expertos

Atendiendo al número de expertos que toman parte en el proceso de Toma

de Decisión, los problemas de decisión se pueden clasificar en dos tipos [86, 87, 89]:

- a) Unipersonales o individuales. Se refiere a problemas donde las alternativas son valoradas por un único experto. Por tanto, para cada alternativa x_i , se tendrá una valoración y_i del experto en un dominio de expresión determinado (numérico, lingüístico, y otros).
- b) Multiexperto. Las decisiones son tomadas por un conjunto (finito) de expertos [192]. Así, cada experto, e_k , proporciona su preferencia y_i^k , sobre la alternativa, x_i .

Un problema de toma de decisión, en el que participan varios expertos, es más complejo que otro en el que la toma de decisión se realiza de forma individual. Sin embargo, el hecho de que intervengan varios expertos con puntos de vista diferentes puede ofrecer una solución más satisfactoria al problema [178].

En la EIIA como proceso interdisciplinario, concurren las opiniones de múltiples evaluadores usualmente organizados en un comité de evaluación, por lo que es imprescindible tener en cuenta que *la EIIA es un problema multiexperto*.

4. Consideración de los cambios en el tiempo.

- a) Estáticos: El punto de vista tradicional o clásico de la toma de decisión no es dinámico debido a que generalmente se tienen en cuenta las preferencias emitidas en un único momento de decisión sobre un único conjunto de alternativas y de acuerdo a un único conjunto de criterios de importancia fija. Es por esto que a este tipo de problemas podemos llamarle estáticos.
 - b) Dinámicos: En un problema dinámico, se tienen en cuenta múltiples momentos de decisión, ya sea para tomar una única decisión al final del proceso o para tomar decisiones en cada uno de los múltiples momentos [35, 208]. Por otra parte, las alternativas y criterios valorados no son necesariamente fijos, es decir en cada momento de decisión el conjunto de alternativas y criterios puede ser diferente. Además, y lo que es esencial en este tipo de problemas, el comportamiento temporal de las
-

alternativas influirá en las decisiones, es decir, no se trata de múltiples soluciones clásicas a un problema, sino que las anteriores valoraciones de las alternativas, influirán en la valoración final.

Las metodologías y técnicas tradicionales de EIIA, usualmente presentan el problema de manera estática. Sin embargo, como se ha descrito en el apartado 2.1.4.2, existen situaciones de decisión, donde es necesario el empleo de métodos de EIIA que permitan emitir una valoración general de un proyecto según su evolución en diferentes períodos de evaluación. En esta memoria, *estamos interesados en modelar ambos tipos de situaciones, tanto estáticas como dinámicas, en el contexto de la EIIA.*

5. Dominios empleados para expresar las preferencias.

Se llama dominio de expresión de preferencias al conjunto de valores utilizados por los expertos para emitir sus preferencias. En la literatura, encontramos que en los problemas de toma de decisiones la información puede ser expresada en distintos dominios, por ejemplo el numérico, el intervalar y el lingüístico. De esta forma, según el o los dominios de información empleados para expresar las preferencias, los problemas se pueden clasificar en:

- a) Homogéneos. Todas las preferencias son emitidas utilizando el mismo dominio de información [58, 70, 76, 206, 207].
- b) Heterogéneos o no-homogéneos. Las preferencias son emitidas utilizando más de un dominio de información [37, 54, 68, 77, 86, 117, 118, 133, 136, 149, 238, 239].

La elección de un dominio de información específico puede estar determinada por los siguientes aspectos:

- Naturaleza de los criterios.

La naturaleza del fenómeno que se evalúa puede condicionar el dominio utilizado para su valoración. Criterios de naturaleza cuantitativa se adecúan mejor a valoraciones de tipo numérico que aquellos de naturaleza cualitativa en los que al tratarse, por ejemplo, percepciones subjetivas, conocimientos vagos, el uso de valoraciones como palabras,

términos lingüísticos (“bueno”, “malo”, “mejor”) o grados de creencias suelen ser apropiado [39, 80, 84, 101, 102, 181].

- Pertenencia de los expertos a diferentes áreas de conocimiento.

Siempre que sea posible, cada experto deseará utilizar un dominio de información que le resulte cercano al tipo de información con el que esté acostumbrado a trabajar en su respectiva área de trabajo. Expertos pertenecientes a áreas relacionadas con las ciencias exactas o técnicas pueden sentirse cómodos utilizando valoraciones numéricas mientras que, aquellos provenientes de áreas sociales pueden preferir utilizar otro tipo de valoraciones no numéricas como las lingüísticas.

- Nivel de conocimiento de los expertos sobre el problema.

La experiencia de los expertos en la resolución de problemas similares puede implicar que unos expertos opten por elegir dominios de expresión precisos como, por ejemplo, escalas con un elevado número de valoraciones, frente a otros expertos con menos experiencia y que se sientan más cómodos utilizando escalas con un menor número de valoraciones.

Algunas de las variables involucradas son de tipo numérico (cuantitativo), mientras que otras son de tipo lingüístico (cualitativo); el modelo matemático que se emplee para efectuar el estudio debe ser capaz de combinar ambos tipos de variables de forma coherente.

Debido a estas razones, en esta memoria presentaremos la *EIIA como un problema heterogéneo donde la elección de los dominios de información estará determinada por la naturaleza de los criterios de evaluación de los impactos ambientales*.

Recordemos que la EIIA es una predicción sobre la forma en que un proyecto repercutirá sobre el entorno, por lo tanto, como en toda predicción, es de esperar que la incertidumbre esté presente en algunos de los parámetros involucrados. Un problema de EIIA normalmente implica: la manipulación de grandes cantidades de datos, de baja calidad, en muchas ocasiones, debido a errores de medición o incluso ausencia de los datos; diferentes escalas espaciales y temporales; comportamientos dinámicos y estocásticos; convergencia de especialistas de diferentes disciplinas y diferentes fuentes de conocimiento; así como otros muchos factores cualitativos o subjetivos [196].

La incertidumbre aparece normalmente en la EIIA debido a que no siempre es posible esperar a tener toda la información necesaria para realizar una valoración adecuada, ya que esto puede llevar mucho tiempo y se paralizaría la toma de decisiones. Además el entorno es muy complejo, y por lo tanto no se puede describir con un único modelo. Esto obliga a modelar el entorno como un conjunto de factores ambientales que sean relevantes, representativos y analizables.

La complejidad de la EIIA además está dada por la multiplicidad de las alternativas a evaluar en un mismo problema de TDMC pues, por un lado, se requiere ordenar los impactos, factores y acciones y, por otro lado, una evaluación global del proyecto, que también podrá ser utilizada para su comparación con otras alternativas de ejecución para un mismo proyecto y por tanto permitirá además obtener un orden de tales opciones.

Claramente entonces *la EIIA puede ser modelada como un problema de toma de decisión definido en un ambiente de incertidumbre, multicriterio, multiexperto y heterogéneo, donde suelen presentarse situaciones dinámicas*, en el que se consideran los siguientes elementos:

- Un conjunto de acciones $A = \{a_j | j \in (1, \dots, n)\}$ a ser ejecutadas como parte del proyecto evaluado.
- Un conjunto de factores ambientales $F = \{f_i | i \in (1, \dots, m)\}$ presumiblemente afectados por las acciones.
- Un conjunto de impactos $I = \{I_{ij} | i \in (1, \dots, m), j \in (1, \dots, n)\}$ causados por las interacciones entre acciones y factores.
- Un conjunto de criterios $C = \{c_h | h \in (1, \dots, p)\}$ que caracterizan estos impactos.
- Un conjunto de expertos $E = \{e_k | k \in (1, \dots, q)\}$ que valoran cada impacto respecto a los criterios definidos.

A continuación revisaremos el modelado de la información en los problemas de toma de decisión y algunos de los dominios de información que se pretenden incorporar en la solución que se brinde para la EIIA.

2.2.2. Modelado de Información en Problemas de Toma de Decisión

El modelado de información juega un papel fundamental en los procesos de toma de decisión debido a que es la base para que los expertos, de acuerdo a su conocimiento, experiencias y creencias, expresen sus valoraciones sobre el conjunto de alternativas y establezcan una preferencia sobre la idoneidad de cada una de ellas como solución al problema. Un modelado de la información adecuado permite que los expertos expresen mejor sus preferencias. Para una revisión breve sobre el modelado de información, consideraremos dos criterios, que suponen dos puntos de vista diferenciados pero igualmente importantes:

1. El dominio de expresión: Conjunto de valores utilizados por los expertos para expresar sus preferencias.

Adaptar el modelado de preferencias al marco en el que se desarrolla el problema de decisión logra que los expertos se sientan más cómodos y seguros a la hora de valorar sus preferencias y, por lo tanto, que la solución final tenga mayor fiabilidad. En la literatura, encontramos que en los problemas de toma de decisión la información puede ser expresada en distintos dominios, siendo los más comunes los siguientes:

a) Dominio Numérico.

El modelado de preferencias utilizando el dominio numérico implica que los expertos expresen sus valoraciones mediante números. Son comunes para evaluar criterios cuantitativos valorados en condiciones de riesgo o certidumbre [192]. Existen dos variantes al respecto:

1) Numérico Binario.

Se caracteriza por utilizar exclusivamente dos valores para cuantificar la utilidad de cada alternativa. Normalmente se utilizan los valores $\{0, 1\}$, donde el 0 representa una valoración negativa de la alternativa y el 1 representa una valoración positiva. La visión tradicional de la toma de decisiones ha estado estrechamente relacionada con el modelado de preferencias mediante dominios binarios donde los expertos sólo podían indicar que una alternativa era considerada como buena o mala para resolver el problema, no teniendo

la posibilidad de modelar cierta incertidumbre sobre la utilidad de cada alternativa como solución al problema. Esta visión rígida o “crisp” de expresión de preferencias ha evolucionado hacia el uso de dominios menos restrictivos que permiten reflejar la incertidumbre presente en los problemas de decisión.

2) Numérico normalizado en el intervalo $[0, 1]$.

Los expertos utilizan un valor numérico en el intervalo $[0, 1]$ para modelar la preferencia sobre cada alternativa [70, 86]. A diferencia del dominio anterior, donde sólo se admiten dos posibles valores, ahora se pueden utilizar valores reales dentro de este intervalo que permiten establecer un orden de preferencia entre las distintas alternativas en función de la utilidad asignada a cada una de ellas. Para los casos en que se tengan valores reales, lo más usual es aplicar un proceso de normalización en $[0, 1]$ antes de manejar los datos.

b) Intervalar.

La necesidad de definir modelados de preferencias más flexibles capaces de reflejar la incertidumbre propició el empleo del dominio intervalar. Son comunes para valorar criterios cuantitativos en situaciones en las que la información es vaga y es difícil para los expertos proveer valores numéricos precisos [221]. Cuando los expertos deben valorar alternativas sobre las que no tienen un conocimiento lo suficientemente preciso para asignarles valores exactos mediante un valor numérico, el uso de valores intervalares hace que los expertos se sientan más seguros en sus valoraciones y que los resultados del problema aunque no sean exactos estén delimitados. La valoración de alternativas por medio de intervalos $V([0, 1])$ del tipo $[a, b]$, $a \leq b$, se ha mostrado como una técnica ampliamente utilizada para tratar la incertidumbre en ciertos problemas de decisión [35, 110, 183]. Para los casos en que $a, b \notin (0, 1)$, lo más usual es aplicar un proceso de normalización en $[0, 1]$ antes de manejar los datos.

c) Términos Lingüísticos.

Existen situaciones de decisión en las que la información disponible es demasiado imprecisa o se valoran aspectos de naturaleza cualitativa.

En ellas, el experto puede considerar más conveniente utilizar una palabra o término lingüístico para expresar sus preferencias que un valor numérico más o menos preciso [57, 80, 132, 135, 231, 232, 233, 235]. Generalmente los expertos se sienten más cómodos utilizando este tipo de dominios lingüísticos, sobre todo si han de valorar aspectos relacionados con percepciones humanas muchas veces expresadas de forma imprecisa y donde es habitual utilizar palabras del lenguaje natural en lugar de números. En la Toma de Decisión Difusa, el Enfoque Lingüístico Difuso [231, 232, 233] es una de las disciplinas encargadas de modelar las preferencias de los expertos mediante valoraciones lingüísticas [18, 37, 82, 118, 189, 206].

2. La estructura de representación: Estructura usada en el problema para almacenar las preferencias de los expertos, que podrán ser:

a) Órdenes de Preferencia.

Este formato de representación de preferencias establece un ranking u orden de alternativas que representa la idoneidad de cada alternativa como solución al problema de decisión según el punto de vista de cada experto. Las preferencias de un experto, $e_k \in E$, sobre un conjunto de alternativas, X , se describen mediante un orden de preferencias individual, $O^i = \{o^i(1), \dots, o^i(n)\}$ donde $o^i(\cdot)$ es una función de permutación sobre el conjunto de índices, $1, \dots, n$, para dicho experto [102, 104, 179].

b) Vectores de Preferencia.

Los valores de preferencia han sido un formato de representación de preferencias muy utilizado en la literatura clásica [44, 180, 205]. En este caso, las preferencias de un experto, $e_k \in E$, sobre un conjunto de posibles alternativas, X , se describen mediante un vector de n valores de utilidad en un dominio D , $U^i = (u_1^i, \dots, u_n^i)$, $u_j^i \in D$.

c) Relaciones de Preferencia.

En la Teoría Clásica de Preferencias [165, 195], las preferencias sobre un conjunto de alternativas, X , se pueden modelar a través de una relación binaria R definida como:

$$x_l R_{x_k} \Leftrightarrow "x_l \text{ no es peor que } x_k"$$

Esta definición considera una relación binaria como una relación de preferencia débil, e implica que dicha relación, R , es reflexiva. Con esta definición, es natural asociar un número real, llamado valoración y denotado $R(x_i, x_j) \in R$, el cual representa el grado de verdad de la afirmación " x_l no es peor que x_k ", o grado de preferencia de la alternativa x_i sobre la alternativa x_j . Cuando el conjunto de alternativas es finito, podemos asociar una matriz P_R a la relación R , tomando como elemento ij -ésimo el valor $R(x_i, x_j)$ [6, 115, 146].

Una relación de preferencia P , sobre un conjunto finito de alternativas X se caracteriza por una función $\mu_P : X \times X \rightarrow D$, donde D es el dominio de representación del grado de preferencia. cuando la cardinalidad de X es pequeña, la relación de preferencia puede representarse por una matriz $P = (p^{lk})$ de dimensión $n \times n$, siendo $p^{lk} = \mu_P(x_i, x_k) \forall l, k \in \{1, \dots, n\}$.

En nuestras propuestas, los expertos utilizarán vectores de preferencias para expresar sus valoraciones, debido a que la forma habitual de evaluar un impacto ambiental o proyecto en la EIHA es valorar cada uno de los criterios que lo definen. Por ello, en los modelos de EIHA que proponemos en esta memoria, *las preferencias de los expertos serán recogidas a través de vectores de utilidad en diferentes dominios de información.*

Retomando los elementos de nuestro problema de EIHA, tendremos que las preferencias serán expresadas en vectores de utilidad $X_{ij}^k = (x_{ij}^{1k}, \dots, x_{ij}^{pk})$, donde x_{ij}^{hk} representa la preferencia del experto $e_k \in E$ sobre el impacto I_{ij} de acuerdo al criterio $c_h \in C$. Cada preferencia podrá ser dada a través de valores en los siguientes dominios de información:

- Valores numéricos (N): $x_{ij}^{hk} = v_{ij}^{hk} \in [0, 1]$.
- Valores intervalares: (V): $x_{ij}^{hk} = V([0, 1]) = [a_{ij}^{hk}, b_{ij}^{hk}]$ con $a_{ij}^{hk}, b_{ij}^{hk} \in [0, 1]$ y $a_{ij}^{hk} \leq b_{ij}^{hk}$.
- Valores Lingüísticos: (S): $x_{ij}^{hk} = s_{ij}^{hk} \in S = \{s_0, \dots, s_g\}$ siendo $g + 1$ la cardinalidad del Conjunto de Términos Lingüísticos (CTL) S , es

decir, la cantidad de términos de S . Cada término lingüístico $s_i \in S$ tiene asociada una función de pertenencia $\mu_{s_i}(y), y \in [0, 1]$. Debido a la importancia de este tipo de información en nuestras propuestas, en el Apéndice A, aparecen detalles sobre el modelado lingüístico de la información.

2.2.3. Resolución de Problemas de Toma de Decisión

A pesar de los distintos problemas de decisión [156] a los que nos podemos enfrentar, el esquema básico para su resolución [48, 70, 164] se compone de las dos fases representadas en la Figura 2.7:

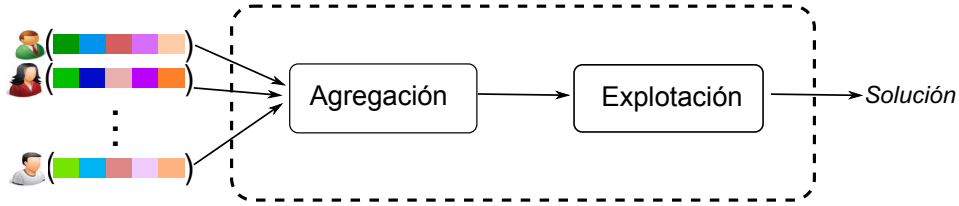


Figura 2.7: Esquema de resolución general de un problema de toma de decisión

1. Fase de agregación:

Su objetivo es obtener un valor colectivo de preferencias para cada alternativa y/o criterio de representación, a partir de los valores individuales de preferencias proporcionados por los expertos que participan en el problema, utilizando un operador de agregación adecuado a las necesidades del problema [9, 11, 12, 34, 52, 139, 140, 144, 212, 217].

2. Fase de explotación:

La información de entrada de esta fase son los valores colectivos obtenidos en la fase anterior. Su objetivo es seleccionar la/s mejor/es alternativa/s a partir de los valores colectivos y la definición de un criterio de selección que permita establecer un orden de mérito entre el conjunto de alternativas al problema. Para ello, se utilizan funciones de selección [146] que permiten seleccionar y ordenar las mejores alternativas a partir de vectores de utilidad o relaciones de preferencia [72, 79, 104, 146, 163].

En la EIIA como en todo proceso de evaluación, nos concentraremos especialmente en la etapa de agregación para luego presentar los resultados de forma comprensible, lo cual apoyará la posterior selección de la mejor alternativa a un proyecto (explotación).

En situaciones de la vida real los decisores no pueden llegar directamente a la agregación y la explotación debido a que muchos factores externos y subjetivos afectan a un problema de decisión. Por lo tanto, la solución puede variar en dependencia de las condiciones y complejidad en las que se presenta el problema.

Debido a que la EIIA es un proceso cognitivo complejo que requiere realizar un estudio metódico y analítico que ayude a los expertos a analizar las alternativas, a continuación revisamos el Análisis de Decisión debido a su utilidad para la organización lógica de los procesos de evaluación.

2.2.4. Análisis de Decisión y Procesos de Evaluación

La toma de decisiones es, por su impacto económico, social y motivacional una actividad de extraordinaria importancia no sólo en los entornos administrativos sino además en la vida cotidiana del ser humano. Como señalan Keeney y Raiffa [105], intenta ayudar a los individuos a tomar decisiones difíciles y complejas de una forma racional. Esta racionalidad implica el desarrollo de métodos y modelos que permitan representar fielmente cada problema y analizar las distintas alternativas con criterios objetivos. Sin embargo, no todo problema de decisión se resuelve por medio de un proceso completamente racional [7, 94].

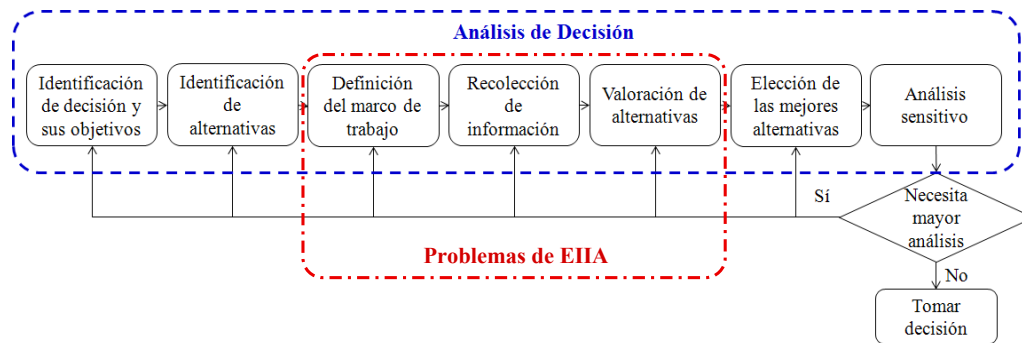


Figura 2.8: Proceso de toma de decisión (adaptado de [48])

Así, el proceso de toma de decisión puede extenderse en las ocho fases [48]

que se muestran gráficamente en la Figura 2.8, siendo denominado el conjunto formado por las siete primeras fases proceso de Análisis de Decisión mientras que la última fase del proceso no está basada necesariamente en factores racionales, ya que pueden influir entre otros factores, los de tipo subjetivo y/o emocional.

Evidentemente las fases de *valoración de alternativas* y *elección de alternativas* del proceso de Análisis de Decisión, coinciden con las fases de *agregación* y *explotación* del esquema básico de resolución de cualquier problema de toma de decisión. El escenario primordial para los modelos de EIIA que presentaremos en esta memoria lo constituyen la *definición del marco de trabajo*, la *recolección de información* y la *valoración de alternativas*.

El Análisis de Decisión es una aproximación prescriptiva diseñada para personas que desean pensar sistemática y exhaustivamente sobre la solución de problemas reales complejos. El Análisis de Decisión trata de ser una fuente de información adicional, que ayude a comprender mejor el problema, la incertidumbre asociada al mismo y los objetivos que se persiguen, y proporciona recomendaciones sobre las acciones a tomar [48]. No se trata de sustituir al decisor sino de apoyarlo. Si el decisor entiende el problema, la aplicación del Análisis de Decisión es exitosa [28].

Ronald Howard [92] describió el Análisis de Decisión como un procedimiento sistemático para transformar problemas de decisión opacos en problemas de decisión transparentes, por medio de una secuencia de pasos lógicos y claros. De tal forma, que el Análisis de Decisión ofrece una metodología que hace énfasis en el entendimiento del problema y sus consecuencias, más que en el proceso de solución.

Howard [93] ilustra la esencia de la decisión a partir de la Figura 2.9. Las patas de la silla son los tres elementos base de cualquier decisión:

- lo que se puede hacer: las alternativas;
- lo que se sabe: la información que se tiene; y
- lo que se desea: las preferencias.

Colectivamente estos elementos conforman la decisión pues sin uno de ellos esta no existe. Aunque la silla puede ser colocada en cualquier lugar, esta también es un elemento importante pues representa el marco de la decisión, que influencia el resto de los elementos.

Teniendo en cuenta que el ámbito de estudio de esta memoria es la EIIA, es necesario señalar que los procesos de evaluación son procesos cognitivos complejos

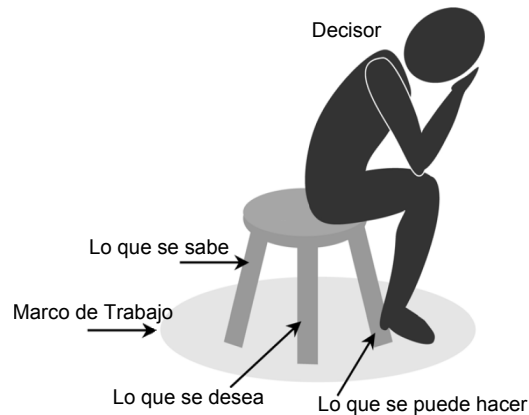


Figura 2.9: Elementos básicos del Análisis de Decisión [93]

[43] que llevan consigo diversos mecanismos que permiten identificar los elementos que van a ser evaluados, fijar el marco o el contexto en el que se va a realizar la evaluación, recopilar la información necesaria para llevar a cabo la evaluación y, finalmente, obtener una valoración de los elementos (impactos ambientales, alternativas de proyectos) evaluados. Diferentes ejemplos que pueden encontrarse en la literatura científica, demuestran que el uso de técnicas de análisis de decisiones ha facilitado la resolución de problemas de evaluación complejos [3, 4, 26, 125]. Es por ello que *los modelos de EIIA propuestos en esta memoria de investigación tendrán una estructura basada en el Análisis de Decisión, en tanto esta nos proveerá de un esquema básico que permite definir los elementos a evaluar (impactos, acciones, factores y/o proyectos), fijar un marco en el que se realizará la EIIA, recopilar la información de los evaluadores que tomen parte en el problema y finalmente calcular un resultado que indique la valoración global de la importancia de los elementos evaluados.*

2.2.5. Principales Limitaciones para la Toma de Decisión en la EIIA

De acuerdo con Lohani et al. [126], los mejores métodos de evaluación de impactos son capaces de organizar una gran cantidad de datos heterogéneos; permitir un resumen de los datos, agregar los datos en conjuntos más pequeños sin pérdida de información y mostrar los datos en bruto y la información obtenida de una

manera directa y relevante. Un aspecto muy importante en la EIIA es maximizar la exactitud de evaluación, garantizando al mismo tiempo que los resultados obtenidos siguen siendo comprensibles [96]. Sin embargo, en el cumplimiento de este propósito, los métodos tradicionales de EIIA presentan limitaciones que, aunque se encuentran relacionadas entre sí, tratamos de delimitar y explicar a continuación:

- Pérdida de la perspectiva subjetiva de la EIIA.

Como se explicó en la sección 2.1 de esta memoria, el concepto de importancia denota la relevancia de los impactos desde un punto de vista subjetivo y estrechamente vinculado con las percepciones y opiniones de los evaluadores o expertos. Sin embargo, como puede verse en el apartado 2.1.3, estos métodos tradicionales representativos utilizan ecuaciones matemáticas, basadas en operaciones aritméticas para obtener un valor numérico de la importancia. Cabe anotar, que además en la mayoría de los casos, no se explica la razón de estas ecuaciones ni su significado semántico. En [15] por ejemplo, los autores revisan esta limitación para el Método de Conesa con el que es imposible por ejemplo, obtener impactos de importancia 0.

- Ausencia de modelado de la incertidumbre:

La incertidumbre es inherente a cualquier proceso de evaluación ambiental, por tanto no es evitable, por lo que es necesario integrarla de alguna manera dentro del proceso de valoración [15, 53, 108, 123, 154]. La incertidumbre que afecta a una EIA puede estar dada por la falta de conocimientos científicos sobre la estructura o función de elementos del ecosistema, de los efectos que pueden producir determinadas acciones sobre estos, y ausencia de modelos predictivos. Para explicarnos mejor, pongamos un ejemplo. Entre los criterios más comunes para la evaluación de la importancia de los impactos se incluyen la extensión, la intensidad, la duración y la sinergia. Varios métodos [16, 49, 73] definen la extensión como el criterio para expresar la extensión espacial de la zona afectada por el impacto. Por lo tanto, puede ser evaluada de forma cuantitativa y expresada, por ejemplo, en km^2 . Sin embargo, como en este caso, muchos aspectos de la incertidumbre en los problemas EIIA tienen características no probabilísticas, debido a que están relacionados con la imprecisión y la vaguedad de sus significados. Entonces puede ser difícil utilizar valores numéricos precisos para evaluar este tipo de criterios. En

nuestro ejemplo tal vez la zona afectada no puede ser directamente medida. En tales casos, otros tipos de dominios de información, como el intervalar o el lingüístico, podrían expresar mejor la preferencia incierta de un experto.

- Tratamiento inadecuado de la información heterogénea:

Puede decirse que en general, los métodos tradicionales de EIIA son estrictamente numéricos e inflexibles debido a que los expertos se ven obligados a utilizar escalas numéricas aunque los criterios sean cualitativos o cuantitativos y por tanto debieran ser evaluados utilizando diferentes dominios de expresión. Aún cuando algunos métodos proponen descriptores lingüísticos que pudieran ser adecuados para modelar la subjetividad de los criterios de importancia ambiental, estos están rigurosamente ligados a escalas numéricas fijas tanto para los valores que puede tomar cada criterio como para los valores finales de la importancia [49, 154]. Generalmente se aplican aproximaciones fijas para la gestión de variables cuantitativas: los valores numéricos son equivalentes a descriptores lingüísticos que se transfieren de nuevo a valores numéricos normalizados para calcular el valor de la importancia. De esta forma, tanto para los criterios cualitativos como para los cuantitativos, tendremos descriptores lingüísticos que representan datos numéricos pero el proceso de agregación tiene como entradas y salidas estos valores numéricos.

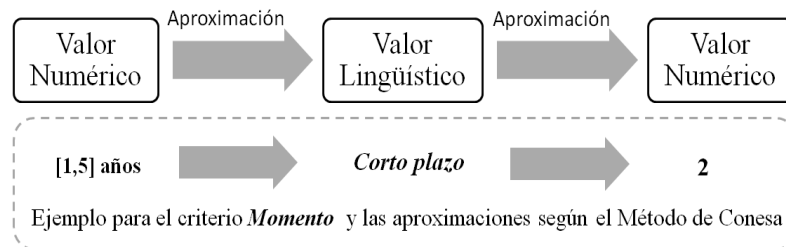


Figura 2.10: Aproximaciones fijas en EIIA

Estos procesos de aproximaciones fijas que se muestran en la Figura 2.10, producen evidentemente inexactitud e imprecisión en los resultados finales y al mismo tiempo suelen dar una perspectiva cuantitativa errónea a un proceso que es cualitativo y subjetivo. Esto a su vez puede provocar que en un proyecto los administradores se centren equivocadamente en tratar impactos irrelevantes, mientras que los impactos más negativos o acciones

agresivas permanecen sin tratamiento, o incluso la selección incorrecta de un proyecto a partir de un conjunto de proyectos alternativos.

- Baja interpretabilidad de los resultados:

Como es lógico, después de agregaciones numéricas, se obtienen resultados numéricos de baja interpretabilidad debido, por una parte, a que los resultados cuantitativos no siempre representan la información cualitativa con precisión, y por otra parte, a la pérdida de información en las diferentes aproximaciones.

La EIIA puede ser considerada como una herramienta de planificación y gestión [16, 198] para el escrutinio público de los programas de desarrollo de empresas, proyectos y actividades industriales. Como proceso interdisciplinario las evaluaciones ambientales pueden involucrar los roles que se muestran en la Figura 2.11, la EIIA con frecuencia implica no sólo a los expertos y técnicos procedentes de diferentes áreas, con diferentes antecedentes y diferente nivel de conocimientos, sino también a los ciudadanos y los políticos que emiten opiniones y preocupaciones, y que también necesitan entender los resultados de las evaluaciones. Por esta razón, aislados resultados numéricos, alejados del lenguaje humano común, pueden afectar la comprensión de la EIIA y su posterior uso como herramienta jurídica y administrativa.

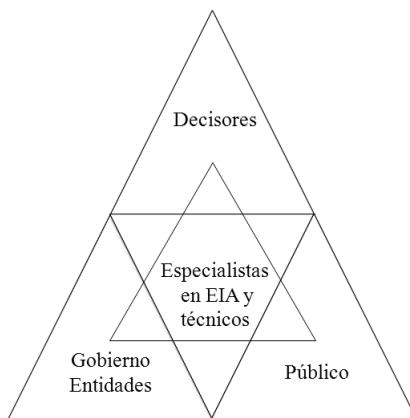


Figura 2.11: Roles comunes implicados en procesos de EIIA (adaptado de [112])

- Incapacidad para modelar la naturaleza dinámica de la EIIA:

Como hemos explicado en la sección 2.1.4.2, los impactos ambientales pueden cambiar en el tiempo por lo que la EIIA debe ser capaz de modelar este fenómeno. Además, la EIIA como método de evaluación debe ser lo suficientemente general y flexible de manera que pueda ser empleado tanto para la predicción anticipada de impactos como para la evaluación posterior de proyectos que debido a su larga duración, necesiten ser controlados más de una vez.

El análisis de las limitaciones expuestas anteriormente, nos conduce lógicamente a pensar que los métodos de EIIA pueden ser significativamente mejorados si, por una parte, el modelado de preferencias se adapta al marco heterogéneo e incierto en el que se desarrolla el problema de análisis de decisión, lo que posibilitará que los expertos se sientan cómodos y seguros a la hora de expresar sus preferencias y, por lo tanto, que la solución final tenga mayor fiabilidad. Esto implicaría el empleo de herramientas que permitan tratar esta información heterogénea logrando mayor precisión, menos pérdida de información y mayor interpretabilidad de los resultados. Y por otra parte, los métodos de EIIA también mejorarán, si se implementa un modelo que permita realizar evaluaciones dinámicas que tengan en cuenta los cambios en los impactos ambientales generados por un proyecto.

Hasta aquí, hemos logrado una clara caracterización del problema de EIIA basado en Análisis de Decisión y la identificación de las insuficiencias de los métodos clásicos para el tratamiento de la información heterogénea y la obtención de resultados comprensibles y por otra parte, para incorporar el modelado dinámico en la solución del problema. Precisamente, nuestros objetivos se enfocan en la solución de estas carencias por lo que en el Capítulo 3 revisaremos diferentes enfoques para el manejo de información heterogénea, así como distintas propuestas para el modelado dinámico en toma de decisión.

Capítulo 3

Contextos Complejos en Toma de Decisión: Tratamiento de Información Heterogénea y Modelado Dinámico

Como ya se ha comentado, los problemas de EIIA pueden estar definidos en contextos complejos bajo incertidumbre caracterizados por la necesidad de tratar información expresada en diferentes dominios y/o por la necesidad de modelar situaciones dinámicas.

En la primera parte de este capítulo revisaremos los diversos enfoques que existen para el tratamiento de información heterogénea. Las soluciones basadas en la unificación de la información en valores lingüísticos, son de las más empleadas y las de mayor relevancia en esta memoria debido a nuestro interés en mejorar la interpretabilidad de los resultados en la EIIA mediante la obtención de resultados cercanos al lenguaje natural común. Por esta razón, revisaremos con mayor profundidad el enfoque basado en la fusión lingüística empleando el Modelo de Representación 2-tupla debido a que nos permite obtener resultados precisos y comprensibles.

En la segunda parte, revisaremos los métodos más importantes para la TDD. En este ámbito podemos encontrar en la literatura dos clasificaciones principales, el enfoque multiperíodo orientado hacia una única decisión final basada en la

información recopilada en diferentes períodos y un enfoque más general que examinaremos con mayor énfasis porque posibilita solucionar este tipo de problemas sin necesidad de emplear toda la información recopilada en cada momento de decisión.

3.1. Tratamiento de Información Heterogénea

En el Capítulo 2, hemos definido los diferentes dominios de información que nos interesa integrar en nuestro Marco Heterogéneo de Evaluación. Se hace necesaria entonces, una revisión de los métodos existentes en la literatura para el tratamiento de información heterogénea, lo cual servirá para seleccionar la propuesta más conveniente para el cumplimiento de nuestro objetivo.

3.1.1. Enfoques para el Tratamiento de Información Heterogénea

Existen varias propuestas para el tratamiento de información heterogénea [37, 86, 117, 118, 238]. La Figura 3.1 muestra su clasificación atendiendo al dominio en que operan los diversos enfoques.

Como puede observarse, se diferencian dos grupos: los que se basan en la unificación de la información en un formato o dominio común para posteriormente manipularla y los que operan directamente con la información, es decir, sin unificarla.

En el apartado 2.2 se analizaron las fases de un esquema básico presentado en [164], para la resolución de un problema de toma de decisión. A continuación revisaremos cómo algunos enfoques para el tratamiento de información heterogénea modifican este esquema básico.

A Enfoque basado en la manipulación directa de la información heterogénea.

Este método fue introducido por Li et al. [117] y como muestra la Figura 3.2 no tiene una fase de unificación debido a que no transforma la información heterogénea en un dominio único sino que directamente calcula las distancias para aquellos criterios expresados en el mismo dominio.

Primero se calculan coeficientes de cercanía en el intervalo $[0, 1]$, entre la evaluación del experto, la Solución Ideal Positiva y la Solución Ideal Negativa,

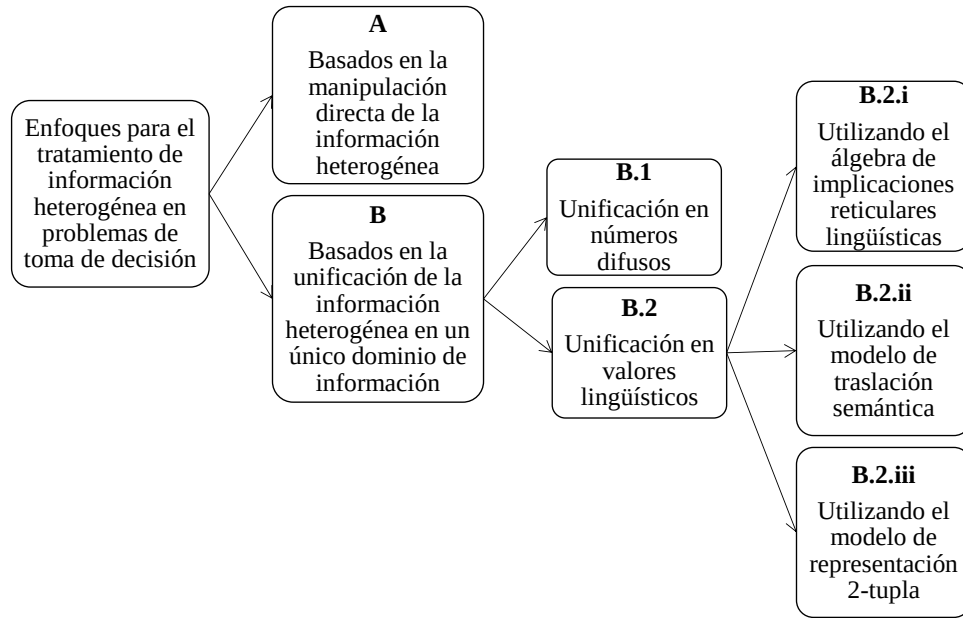


Figura 3.1: Clasificación de Enfoques para el Tratamiento de Información Heterogénea en Problemas de Toma de Decisión

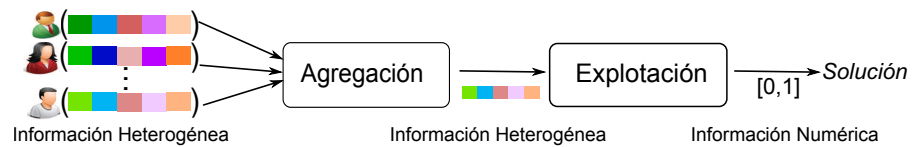


Figura 3.2: Resolución basada en la manipulación directa de la información

empleando la distancia de Minkowski. Esto se hará para cada criterio, que por supuesto, estará solamente evaluado en un solo dominio de expresión.

Estas distancias son agregadas para obtener un coeficiente de cercanía de cada alternativa a la Solución Ideal Positiva por cada experto.

Finalmente estos coeficientes son agregados para obtener un coeficiente colectivo que también es utilizado para obtener el ranking final.

B Enfoque basado en la unificación de la información heterogénea en un único dominio de información.

La idea básica de este tipo de soluciones, está en expresar la información heterogénea en un marco común para luego operar con la misma en la fase de agregación. Así, los operadores de agregación empleados dependerán del dominio único seleccionado para unificar la información heterogénea de entrada. Las siguientes propuestas siguen esta variante de unificación inicial:

B.1 Enfoque basado en la unificación en números difusos.

Este enfoque, introducido por Zhang y Lu [238], está basado en la unificación de la información heterogénea en números difusos triangulares que son agregados para obtener un índice por cada alternativa considerando su distancia a la Solución Ideal Positiva y a la Solución Ideal Negativa.

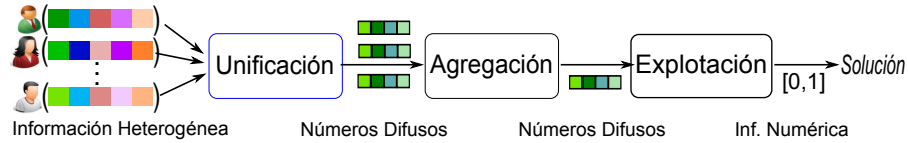


Figura 3.3: Resolución basada en la unificación en números difusos

Inicialmente las preferencias de tipo numérico, lingüístico e intervalar son transformadas en números difusos triangulares en un CTL. Para ello existen diferentes funciones de transformación de acuerdo al dominio de la información que se desea transformar.

Después, usando operaciones aritméticas difusas, se calcula una evaluación colectiva para cada alternativa. Este resultado también será un número difuso triangular.

Por último, usando las funciones de distancia entre dos números difusos, para cada alternativa se calcula un coeficiente de cercanía (que tiene en cuenta la distancia a la Solución Ideal Positiva y a la Solución Ideal Negativa). Este coeficiente es un número real positivo y se utiliza para generar el ranking final de alternativas.

B.2 Enfoque basado en la unificación de la información en valores lingüísticos.

Este tipo de enfoque primero unifica la información heterogénea en valores lingüísticos utilizando diferentes funciones de transformación y

luego opera con ellos para obtener una valoración final lingüística de cada alternativa, que es empleada para obtener el ranking final. Esta decisión se debe principalmente a que el uso de este tipo información facilita la comprensión de los resultados por parte de todos los expertos que participan en el proceso. Es necesario anotar que por una parte, el uso del Enfoque Lingüístico Difuso ha proporcionado buenos resultados modelando este tipo de preferencias [18, 57, 82, 189, 206]; y por otra, el uso de información lingüística implica la necesidad de realizar procesos de Computación con Palabras. Es por ello que en el Apéndice A de esta memoria, se introducen ambos paradigmas.

El esquema básico es extendido en la Figura 3.4 para la resolución de un problema de toma de decisión heterogéneo basado en la unificación de la información en valores lingüísticos.

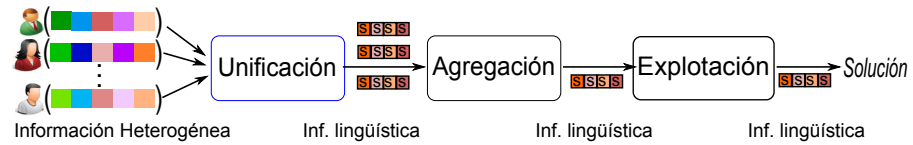


Figura 3.4: Resolución basada en la unificación en valores lingüísticos

Existen varias propuestas que se basan en este esquema de unificación en valores lingüísticos, de las cuales resaltamos las siguientes:

B.2.i Enfoque Basado en Implicaciones Algebraicas Reticulares Lingüísticas:

Este enfoque fue introducido por Li et al. en [118] respondiendo a la necesidad de manipular información lingüística que no estuviera linealmente ordenada. Desde el punto de vista de la Computación con Palabras, el enfoque está basado en la propuesta introducida por Xu en [206]. Los términos lingüísticos, no tienen asignada ni semántica ni sintaxis sino que el modelo de representación está basado en implicaciones algebraicas reticulares. Debido a que las técnicas convencionales de agregación de información operan sobre conjuntos de términos totalmente ordenados, Li et al. proponen un operador de agregación para situaciones donde los argumentos a

agregar pueden ser incomparables. Este enfoque sólo está definido para tratar información lingüística y numérica por lo que la unificación se realiza a través de una única función de transformación que convierte valores en $[0, 1]$ en valores lingüísticos.

B.2.ii Enfoque Basado en la Fusión Lingüística Utilizando el Modelo de Representación Traslación Semántica:

Este enfoque fue introducido por Carrasco et al. basado en el modelo difuso de translación semántica [37]. Para el tratamiento de la información heterogénea, este enfoque representa cada valor (numérico, intervalar o lingüístico) mediante funciones de pertenencia trapezoidales y posteriormente se emplean operaciones de la aritmética difusa para operar con ellos en la fase de agregación.

B.2.iii Enfoque Basado en la Fusión Lingüística Utilizando el Modelo de Representación 2-tupla:

Este enfoque fue introducido por Herrera et al. en [86] y define un conjunto de funciones de transformación que permiten convertir valores expresados en diferentes dominios de expresión (numérico, intervalar o lingüístico) a valores lingüísticos expresados en 2-tuplas [82] de un determinado conjunto lingüístico seleccionado con el objetivo de guardar el mayor conocimiento posible. En el Apéndice A de esta memoria de investigación, se revisa en detalle el Modelo de Representación Lingüística con 2-tupla.

Los coeficientes de similitud o cercanía calculados en los enfoques **A** y **B.1** [117, 238] son números reales que si bien permiten obtener un ranking de las alternativas, carecen de interpretabilidad y no permiten otro análisis más allá del ranking. Esta es la razón por la cual no los consideramos adecuados para la EIHA, pues aislados resultados numéricos no son apropiados para que los expertos y público en general, comprendan los resultados del proceso de evaluación.

Por otra parte, las propuestas basadas en la fusión en valores lingüísticos (**B.2**) obtienen como resultados valores también lingüísticos fácilmente interpretables por los involucrados en la EIHA. Dentro de este grupo, destacamos el enfoque basado en el modelo de representación de información lingüística con 2-tuplas por presentar las siguientes ventajas:

- Se basa en un modelo de representación continuo, por lo que puede representar cualquier información del universo del discurso, mediante las 2-tuplas lingüísticas.
- Tiene asociado un modelo computacional robusto, ampliamente extendido, que permite operar con 2-tuplas lingüísticas sin pérdida de información.

El enfoque de fusión lingüística utilizando el modelo difuso 2-tupla parece entonces adecuado para la solución de nuestro problema de EIHA en tanto ofrece resultados cercanos al lenguaje humano natural y provee un alto nivel de interpretabilidad a la vez que permite implementar procesos de Computación con Palabras de forma precisa al mejorar el proceso de retransformación (ver apartados A.3 y A.4). Además, ha obtenido resultados satisfactorios en otros problemas de análisis de decisión heterogéneos [54, 68, 69, 133, 149]. Por tanto, a continuación revisaremos con mayor profundidad este enfoque.

3.1.2. Tratamiento de Información Heterogénea Basado en la Fusión Lingüística Utilizando el Modelo de Representación 2-tupla

La fusión en valores lingüísticos se realiza a través de los tres pasos que se muestran en la Figura 3.5.

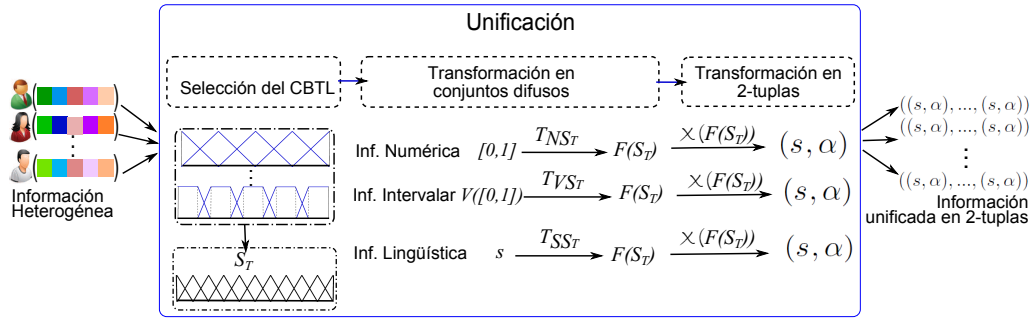


Figura 3.5: La unificación en 2-tuplas lingüísticas

1. Selección del Conjunto Básico de Términos Lingüísticos (CBTL)

El operar sobre este tipo de información heterogénea, en un proceso de decisión, implica su modelado en un marco común de expresión para poder

operar sobre ella. Este proceso consiste en unificar la información de entrada en un único dominio de expresión. Tal y como ha sido indicado anteriormente la unificación se llevará a cabo utilizando conjuntos difusos sobre el dominio lingüístico, CBTL, y simbolizado por S_T . En este dominio representaremos toda la información de entrada suministrada por los expertos transformándola en información homogénea mediante conjuntos difusos en el CBTL.

La selección del CBTL no es aleatoria, sino que sigue un proceso que tiene en cuenta los diferentes dominios utilizados en la definición del problema, según las siguientes reglas [86]:

- Buscar S_L : CTL de máxima granularidad en el Marco Heterogéneo de Evaluación.
- Si S_L es una partición difusa [166] y las funciones de pertenencia de sus términos son triangulares (véase el Apéndice A), $s_i = (a_i, b_i, c_i)$, entonces:
 - Si S_L es único o todos los S_L tienen la misma semántica, entonces:

$$S_T = S_L$$
- Si no, $S_T = S^{11} = \{s_0, \dots, s_{10}\}$. Si la semántica de al menos dos CTL es diferente entonces el CBTL es el CTL con el máximo número de términos que una persona puede discriminar. Este ha sido un aspecto tratado en [141], donde se indica que esta cantidad puede estar entre 7 y 9. Así, podremos escoger un CBTL con 11 términos simétricamente distribuidos, con lo que mantendremos la máxima cantidad de información [81, 83].

2. Transformación en un Conjunto Difuso:

En dependencia de los dominios de información, existen diferentes funciones de transformación que convierten la información heterogénea de entrada en conjuntos difusos, por lo que estas transformaciones se realizarán utilizando procesos de comparación entre conjuntos difusos. Todas estas medidas trabajan en entornos difusos pues operan con valores imprecisos e inexactos. Para transformar la información de entrada en conjuntos difusos en el CBTL utilizaremos medidas de semejanza (ver lo parecido que son dos conjuntos

difusos). En [25] puede encontrarse la definición de una medida (M-medida) de semejanza.

Cada valor de entrada x , perteneciente a uno de los dominios anteriores, es transformado en un conjunto difuso, $F(S_T)$, en S_T , empleando funciones que transforman:

- a) La información numérica en $F(S_T)$.
- b) La información intervalar en $F(S_T)$.
- c) La información lingüística en $F(S_T)$.

A continuación se revisan cada una de las funciones de transformación:

- a) Información numérica

Definición 1 [86] Sea $x \in [0, 1]$ un valor numérico y $S_T = \{s_0, \dots, s_g\}$ un CTL, la función de transformación $T_{NS_T} : [0, 1] \rightarrow F(S_T)$ definida como $T_{NS_T}(x) = \sum_{i=0}^g s_i / \gamma_i$ transforma un valor numérico en un conjunto difuso en S_T :

$$\gamma_i = \mu_{s_i}(x) = \begin{cases} 0, & x < a \text{ o } x > c, \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b, \\ 1, & b \leq x \leq d, \\ \frac{c-x}{c-d}, & d < x < c, \end{cases} \quad (3.1)$$

donde $F(S_T)$ es el conjunto de difuso en S_T , $\gamma_i = \mu_{s_i}(x) \in [0, 1]$ es la función de pertenencia de x a $s_i \in S_T$, y (a, b, d, c) es una función de pertenencia paramétrica.

- b) Información intervalar

Definición 2 [86] Sea $V([0, 1])$ un intervalo en $[0, 1]$, la función de transformación $T_{VS_T} : V \rightarrow F(S_T)$ definida como $T_{VS_T}(V) = \sum_{i=0}^g s_i / \gamma_i$, transforma un intervalo $V([0, 1])$ en un conjunto difuso en S_T :

$$\gamma_i = \max_x \min\{\mu_V(x), \mu_{s_i}(x)\}, \quad i = \{0 \dots, g\}$$

donde $F(S_T)$ es el conjunto difuso en S_T , y para $x \in V([0, 1]) = [d, e]$:

$$\mu_V(x) = \mu_{s_i}(x) = \begin{cases} 0, & x < d, \\ 1, & d \leq x \leq e, \\ 0, & x > e. \end{cases} \quad (3.2)$$

c) Información Lingüística

Definición 3 [86] Sea $S = \{s_0, \dots, s_g\}$ un CTL, la función de transformación $T_{SS_T} : S \rightarrow F(S_T)$ definida como $T_{SS_T}(s_j) = \sum_{i=0}^g s_i / \gamma_i$ transforma un término lingüístico en un conjunto difuso en S_T :

$$\gamma_i = \max_y \min\{\mu_{s_j}(y), \mu_{s_i}(y)\}, \quad i = \{0 \dots, g\}$$

donde $F(S_T)$ es el conjunto difuso en S_T y μ_{s_j} y μ_{s_i} son las funciones de pertenencia asociadas con los términos $s_j \in S$ y $s_i \in S_T$ respectivamente.

3. Transformación de Conjuntos Difusos sobre el CBTL en 2-tuplas Lingüísticas del CBTL

Sólo nos queda presentar la función de transformación $\chi : F(S_T) \rightarrow S_T \times [-0.5, 0.5] = \tilde{S}$ que transforma los conjuntos difusos sobre el CBTL, en 2-tuplas lingüísticas pertenecientes al CBTL.

Definición 4 [132] Sea $F(S_T)$ un conjunto difuso en S_T , la función de transformación se define como:

$$\chi(F(S_T)) = \Delta \left(\frac{\sum_{j=0}^g j \gamma_j}{\sum_{j=0}^g \gamma_j} \right) = \Delta(\beta) = (s_l, \alpha)$$

donde el conjunto difuso $F(S_T)$ se obtiene a partir de T_{NS_T}, T_{SS_T} or T_{VS_T} , respectivamente.

Una vez que todos los valores han sido unificados en 2-tuplas lingüísticas, la agregación puede realizarse utilizando los operadores de agregación definidos en el Modelo Computacional 2-tupla, revisado en la Sección A.4 del Apéndice A. Seguidamente, los valores de preferencia colectiva son ordenados según los operadores de comparación descritos en el Modelo Computacional.

3.2. Modelado Dinámico en Toma de Decisión

La naturaleza dinámica del contexto donde se toma la decisión, es uno de los factores fundamentales que influye en la complejidad de los procesos de Análisis de Decisión para la resolución del problema. Los problemas de TDD suelen demandar procesos complejos de Análisis de Decisión que pueden extenderse a lo largo de varios períodos o momentos de decisión, en los que los elementos del problema pueden sufrir cambios. Así por ejemplo, nuevas alternativas pueden aparecer mientras que otras pueden ser eliminadas o no estar disponibles durante el transcurso del problema. Por otra parte los criterios también pueden cambiar o pueden darse cambios en su importancia en los distintos momentos de decisión. Como hemos destacado, los métodos convencionales de EIIA no permiten modelar su naturaleza dinámica a pesar de que los impactos ambientales cambian en el tiempo. En esta segunda parte del capítulo, revisaremos las características fundamentales de un problema de TDD y analizaremos diferentes enfoques para su resolución, lo que posibilitará determinar cuál de ellos nos permitirá plantear una solución a los problemas de EIIA en contextos dinámicos.

3.2.1. Caracterización de los Problemas de TDD

Como hemos visto en el Capítulo 2, un problema de TDMC consiste en la selección de la mejor alternativa de un conjunto de alternativas, de acuerdo a un conjunto de criterios [156, 192]. Existen problemas en la vida real donde es necesario considerar la evolución temporal de tales alternativas, lo que significa que a través del tiempo, las alternativas podrán desaparecer, otras nuevas podrán ser valoradas, y además también podrá modificarse el comportamiento de otras de acuerdo a los criterios considerados. Estos problemas se definen como dinámicos [35, 120, 168] y lógicamente son de mayor complejidad que los problemas clásicos de TDMC.

Por ejemplo, en la evaluación dinámica del personal, los resultados de la evaluación de un trabajador, pueden estar influenciados por las evaluaciones anteriores. La persona que obtuvo una evaluación muy buena con anterioridad, tiene ventajas para procesos de evaluación posteriores. La solución de un problema de TDD es un proceso continuo y progresivo donde las decisiones en diferentes períodos tienen relación entre ellas [240]. En la literatura podemos encontrar diversos problemas

de este tipo relacionados con la selección de proveedores, evaluación de inversiones, diagnóstico médico, evaluación de personal, evaluación de la eficiencia de sistemas militares, análisis de riesgos, selección de lugares de aterrizaje [59, 160, 240], entre otros.

La naturaleza dinámica de algunas decisiones fue tempranamente estudiada en investigaciones en el campo de la psicología sobre el comportamiento de los seres humanos en ambientes dinámicos de decisión o donde se tienen variables relacionadas con el tiempo, lo que propició el surgimiento de la teoría de la decisión dinámica [66, 186]. Desde estas investigaciones, se enfatizaba que en entornos dinámicos, pueden cambiar tanto la velocidad con que se toman las decisiones como las preferencias que se proveen [191]. En el área de los sistemas dinámicos, algunos estudios se desarrollaron además para resolver tareas de decisión dinámicas [60, 176].

De manera general, las tres características distintivas de un problema de TDD son las siguientes [35, 36, 120, 168, 240]:

1. La dimensión tiempo es considerada, es decir, se tienen en cuenta diferentes momentos de decisión.
2. Las alternativas no son fijas.
3. Los criterios no son fijos.
4. El perfil o comportamiento temporal de una alternativa se tiene en cuenta para su comparación con otra alternativa.

En cuanto al carácter cambiante de las alternativas, Weiss implementó el Proceso de Análisis Jerárquico [167] para modelar situaciones en las que las alternativas aparecen en el problema de forma sucesiva y secuencial y no simultáneamente [202]. Además Satty remarcó que si las alternativas evolucionan durante varios períodos junto con las preferencias de los decisores entonces se requieren respuestas diferentes y continuas a través del tiempo [168]. El último punto está relacionado con la noción de retroalimentación en la continuidad y relación entre los resultados de las decisiones en los diferentes momentos [120, 161].

Seguidamente estudiaremos cómo diferentes autores han planteado soluciones desde distintas perspectivas a este tipo de problemas.

3.2.2. Enfoques para la Resolución de Problemas de TDD

A partir de estos antecedentes, como ilustra la Figura 3.6, se han desarrollado dos enfoques fundamentales para la resolución de problemas de TDD, que a continuación revisaremos.

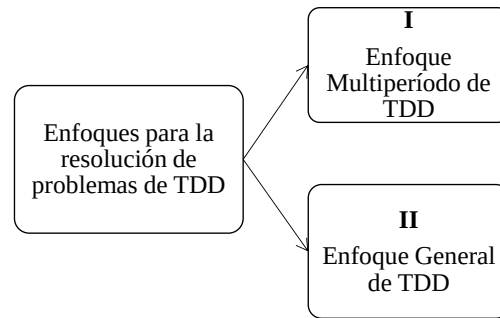


Figura 3.6: Clasificación de Enfoques para el Modelado Dinámico en Problemas de Toma de Decisión

I Enfoque Multiperíodo

La característica fundamental de las soluciones bajo este enfoque es que las preferencias son recogidas en múltiples períodos y utilizada en su totalidad para tomar una única decisión al final del proceso [208]. En esencia, el problema de TDD es descompuesto en múltiples problemas no dinámicos de TDMC, para resolver cada uno de ellos mediante los métodos clásicos de toma de decisión [156, 192].

Específicamente la propuesta de Xu [208] define un problema multiperíodo donde primero se procede al cálculo de las valoraciones colectivas de las alternativas en cada período utilizando el operador de agregación Suma Ponderada. Posteriormente se realiza el cálculo de los pesos de los períodos, que pueden ser directamente definidos por los decisores o identificados a través de métodos basados en series aritméticas, series geométricas o distribuciones normales [208]. Por último, para cada alternativa se calcula una valoración final colectiva que tendrá en cuenta las valoraciones obtenidas anteriormente para cada período, las cuales se agregarán utilizando un Operador Suma Ponderada Dinámica. El orden de las alternativas se obtiene de acuerdo al

orden decreciente de las evaluaciones dinámicas y si es necesario se selecciona la mejor.

Si retomamos el esquema básico para la resolución de un problema de toma de decisión, presentado en la Figura 2.7, podemos decir entonces que tendremos múltiples procesos de agregación, tantos como períodos se consideren en el problema y una agregación final que tendrá en cuenta los resultados previos, tal y como muestra la Figura 3.7.

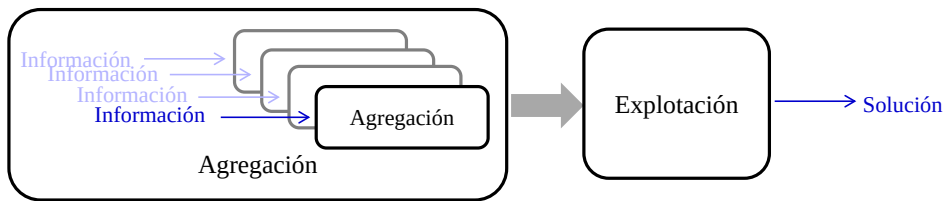


Figura 3.7: Esquema de resolución multiperíodo para problemas de TDD

Siguiendo este esquema de resolución en la literatura podemos encontrar otras propuestas [40, 51, 120, 174, 177, 182, 184, 199, 200, 227, 239] con modificaciones mayormente basadas en la Técnica para Ordenar Preferencias por su Similitud a la Solución Ideal (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*, TOPSIS) [95, 229].

II Enfoque General de TDD

Las soluciones multiperíodos se enfocan en agregar las valoraciones recogidas en varias iteraciones y utilizarlas para emitir una evaluación final. Se pueden considerar enfoques de TDD en tanto esta solución tiene en cuenta todas las valoraciones anteriores pero no son adecuados cuando se enfrentan problemas que incluyen por ejemplo una gran cantidad de alternativas y criterios y donde además igualmente se requiere un número elevado de iteraciones. Sin embargo existen otro tipo de problemas donde se requiere una solución, bien en cada una de estas iteraciones, o bien al final de todas ellas, pero donde cada solución final o intermedia, debe tener en cuenta las soluciones anteriores [35, 36, 147, 160].

Para tratar estas situaciones, y las anteriores, surge la propuesta de Campa-nella y Ribeiro [35], que para la resolución de un problema de TDD propone,

inicialmente el cálculo de una evaluación no dinámica de cada alternativa en cada período a través de algún método convencional de toma de decisión. A partir del segundo momento de decisión, se calcula además una evaluación dinámica para cada alternativa empleando operadores de agregación asociativos que evitan guardar toda la información del problema de decisión, siendo necesario guardar únicamente la evaluación dinámica de cada alternativa en el período anterior y el actual. Además, se puede establecer una política de retención que module la información de las alternativas que serán recordadas de un período a otro. La Figura 3.8 resume la esencia de la resolución de problemas bajo este modelo general de TDD.

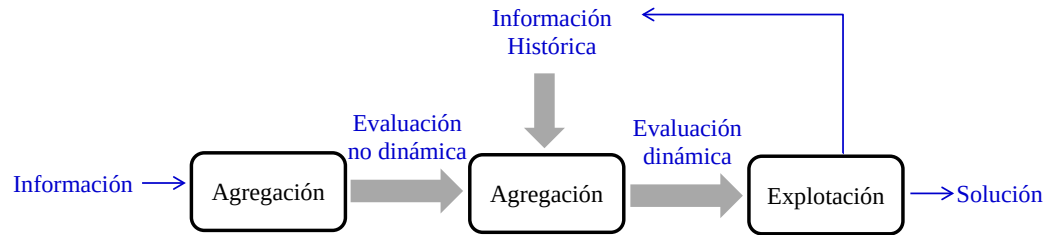


Figura 3.8: Esquema general de resolución de un problema de TDD

Una de las principales limitaciones de los enfoques multiperíodos es que para emitir la evaluación final, guardan y agregan toda la información recopilada en cada uno de los períodos. En los problemas de EIIA, se suelen valorar grandes cantidades de acciones y factores ambientales, lo que hace que también puedan darse una elevada cantidad de impactos ambientales. Por ejemplo, algunos modelos genéricos de EIIA proponen un potencial de hasta 8800 impactos [116]. Este elemento adquiere mayor complejidad cuando se analizan, para un mismo proyecto, diferentes alternativas de solución.

Además, los enfoques multiperíodos no se adaptan fácilmente a entornos heterogéneos como los que son de interés en esta memoria, puesto que han sido concebidos para dominios de información específicos y por consiguiente, restringidos al uso estricto de determinados operadores de agregación. Por ejemplo, números intuicionistas [174, 177, 182, 199, 209, 239], números grises [51, 120, 184, 200], números intervalares en $[0,1]$ [208], números difusos triangulares [227] y números difusos intuicionistas triangulares [40].

Por otra parte, el modelo general de Campanella y Ribeiro [35] formaliza la TDD como extensión de los modelos clásicos de TDMC, lo que lo convierte en un enfoque general, no dependiente de dominios de información u operadores de agregación. Esta propuesta es flexible y adaptable a cualquier problema de TDD: los que requieren una única decisión final con enfoque multiperíodo; los que requieren diferentes y sucesivas decisiones donde la última estará influenciada por las anteriores; e incluso problemas de consenso.

Como hemos destacado, la propiedad de asociatividad del operador de agregación evita que tengamos que guardar toda la información de todas las alternativas para todos los períodos, aunque no evita la obtención de iguales evaluaciones dinámicas para diferentes alternativas independientemente del comportamiento que hayan tenido en los diferentes períodos evaluados.

Por estos motivos el enfoque general de TDD parece lógico y adecuado para la solución de nuestro problema de EIIA en tanto ofrece un enfoque flexible y general para la resolución de problemas de toma de decisión dinámica. A continuación revisamos este enfoque con mayor profundidad.

3.2.3. Modelo General para la Toma de Decisión Dinámica

Este modelo fue definido por Campanella y Ribeiro en [35] y su objetivo es resolver problemas dinámicos donde los criterios y alternativas cambian a lo largo del tiempo. Para su mejor comprensión, a continuación se revisan la notación y conceptos básicos de este modelo, cuyo mecanismo de funcionamiento han resumido sus autores como muestra la Figura 3.9.

- $A_t = \{a_1, \dots, a_m\}$ es el conjunto de alternativas disponibles en cada momento de decisión $t \in T$.
 - $T = \{1, 2, \dots\}$ es el conjunto (posiblemente finito) de momentos de decisiones discretos que se tienen en cuenta en el problema.
 - Como hemos destacado, en cada momento de decisión tendremos diferentes alternativas, ya sea porque algunas no estén disponibles, porque otras hayan sido eliminadas y/o porque otras nuevas estén disponibles según los objetivos del problema. Además los criterios pueden variar tanto en valor como en peso. La información acerca del conjunto de alternativas a través del tiempo
-

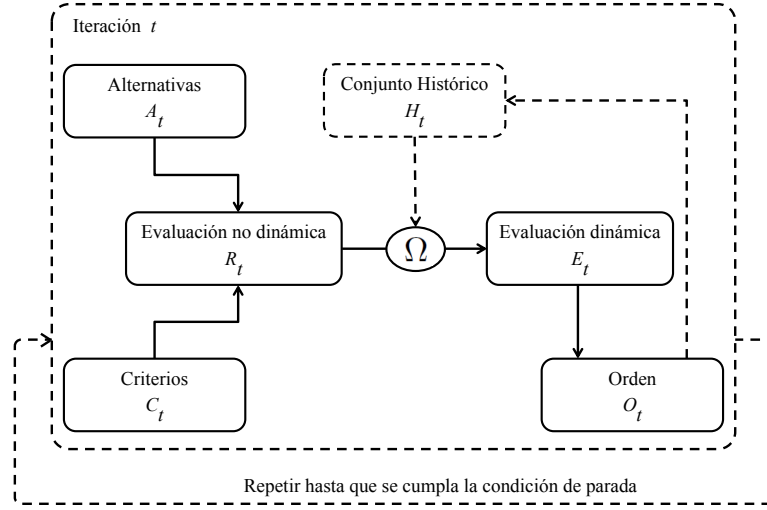


Figura 3.9: Operaciones en el Modelo General para la TDD (adaptado de [35])

es transmitida de una iteración a la siguiente en un conjunto histórico H_t definido como:

$$H_0 = \emptyset, \quad H_t = \bigcup_{t' \leq t} A_{t'}, \quad t, t' \in T \quad (3.3)$$

En cada período $t \in T$ se realizan los siguientes pasos:

1. Cálculo de las evaluaciones no dinámicas.

Para cada alternativa evaluada $a_j \in A_t$, se calcula la *evaluación no dinámica* $R_t(a_j) \in [0, 1]$. Una de los métodos más usuales para calcular $R_t(a_j)$ es utilizando un operador de agregación $\Theta : [0, 1]^n \rightarrow [0, 1]$, que combina las valoraciones para cada criterio, $c_i \in C_t = \{c_1, \dots, c_n\}$ de acuerdo a sus pesos $W_t = \{w_1, \dots, w_n\}$, $w_i \in [0, 1]$, $\sum_{i=1}^n w_i = 1, \forall t \in T$. Básicamente este paso es desarrollado siguiendo los métodos clásicos de toma de decisión [156, 192].

2. Cálculo de las evaluaciones dinámicas.

La naturaleza dinámica del proceso de decisión es la función de evaluación $E_t : H_t \rightarrow [0, 1]$, definida para cada $t \in T$ como:

$$E_t(a_j) = \begin{cases} R_t(a_j), & a_j \in A_t \setminus H_{t-1} \\ \Omega(E_{t-1}(a_j), R_t(a_j)), & a_j \in A_t \cap H_{t-1} \\ E_{t-1}(a_j), & a_j \in H_{t-1} \setminus A_t \end{cases} \quad (3.4)$$

Donde $\Omega : [0, 1]^2 \rightarrow [0, 1]$ es un operador de agregación asociativo que puede aplicar diferentes tipos de refuerzo de acuerdo a las actitudes que se deseen modelar en el problema.

De esta forma el cálculo de las evaluaciones dinámicas estará determinado por las siguientes reglas:

- Si la alternativa pertenece sólo al conjunto actual de alternativas, $a_j \in A_t \setminus H_{t-1}$, su evaluación dinámica es igual a la evaluación no dinámica en ese período.
- Si la alternativa pertenece a ambos conjuntos (histórico y actual) $a_j \in A_t \cap H_{t-1}$, entonces su evaluación dinámica se obtiene mediante la agregación de la evaluación dinámica en el período anterior y la evaluación no dinámica actual.
- Si la alternativa pertenece sólo al conjunto histórico de alternativas, $a_j \in H_{t-1} \setminus A_t$, su evaluación dinámica es igual a la evaluación dinámica en el período anterior.

3. Explotación

El orden de las alternativas se obtiene de acuerdo al orden decreciente de las evaluaciones dinámicas y si es necesario se selecciona la mejor, que será la de mayor evaluación dinámica.

4. Actualización de la información histórica.

Una de las desventajas de los enfoques multiperíodo es que deben utilizar o agregar toda la información recopilada en cada uno de los períodos para emitir la evaluación final, lo que dificulta la resolución de problemas complejos de gran escala, donde se valoran un elevado número de alternativas de acuerdo a numerosos criterios y donde también pueden intervenir gran cantidad de expertos. En estos casos Campanella y Ribeiro proponen aplicar una

política de retención que, como mecanismo de memoria del proceso, se encarga de seleccionar las alternativas que serán recordadas de una iteración a la próxima. De este modo, la política de retención puede ser vista como la regla que define las alternativas que pertenecen al conjunto histórico. Por ejemplo, pueden acumularse todas las alternativas que sobrepasen cierto umbral en la evaluación o las k primeras según el orden obtenido en el paso anterior. Esta iniciativa puede ser útil en problemas a gran escala, donde se manejan grandes cantidades de alternativas [148, 160].

El modelo general de TDD también permite modelar problemas multiperíodos considerando una política de retención donde se recuerdan todas las alternativas durante todo los períodos incluidos en el problema.

En el modelo es importante el papel de las propiedades del operador de agregación, Ω , utilizado para el cálculo de las evaluaciones dinámicas. Por una parte, la asociatividad del operador evita que tengamos que guardar toda la información de todas las alternativas para todos los períodos. Y por otra parte, el refuerzo [160, 224] (ver Apéndice B para mayor detalle) permite modelar distintas actitudes de los decisores al reforzar diferentes tendencias en las evaluaciones de las alternativas en los diferentes períodos, por ejemplo para:

- *Priorizar evoluciones de decrecimiento:* Cuando necesitamos reforzar la tendencia de valores bajos en la evaluación no dinámica a lo largo del tiempo, es adecuado el uso de operadores con refuerzo hacia abajo.
- *Priorizar evoluciones de crecimiento:* Cuando por el contrario, los valores altos son mejor considerados, un operador con refuerzo hacia arriba es adecuado para reforzar esta tendencia.
- *Refuerzo total:* Los operadores con refuerzo total son adecuados para situaciones que requieren modelar ambos comportamientos.

Una vez que hemos revisado en este capítulo los diferentes enfoques para modelar contextos complejos de toma de decisión bajo incertidumbre, en los siguientes capítulos plantearemos nuestras propuestas para modelar este tipo de situaciones en problemas de EIIA.

Capítulo 4

Modelo de Evaluación de la Importancia del Impacto Ambiental en Contextos Heterogéneos

Los procesos de EIIA se realizan en ambientes bajo incertidumbre. Este hecho hace que el conocimiento sobre los criterios evaluados (que tienen diferente naturaleza, cualitativa o cuantitativa) sea vago o al menos impreciso. A pesar de que la incertidumbre es inherente a cualquier proceso de evaluación ambiental [15, 53, 108, 123, 154], los métodos tradicionales de EIIA emplean escalas precisas de valores numéricos para evaluar todo tipo de criterios. Como es lógico, después de agregaciones numéricas, se obtienen resultados numéricos de baja interpretabilidad debido a que estos resultados cuantitativos no representan la información cualitativa y a que pierden información en las diferentes aproximaciones. En tales casos, otros tipos de dominios de información, como el intervalar o el lingüístico, podrían expresar mejor la preferencia incierta de un experto.

En el Capítulo 3, se revisaron diversas propuestas para el tratamiento de información heterogénea en problemas de toma de decisión, sin embargo, no existen experiencias de su aplicación a la EIIA. Como hemos explicado, los enfoques basados en la fusión en valores lingüísticos se muestran adecuados para solucionar un problema de EIIA, debido a que permiten obtener resultados lingüísticos inter-

pretables. Dentro de este grupo, hemos decidido emplear el enfoque basado en la fusión lingüística utilizando el Modelo de Representación Lingüística 2-tupla, debido a que ofrece por una parte, un modelo de representación fácil de comprender y continuo, por lo que puede representar cualquier información del universo del discurso, y por otra, un modelo computacional robusto de menor complejidad en su uso.

En este capítulo propondremos un nuevo modelo para la EIIA en contextos heterogéneos. Para presentar el modelo, primero describiremos su estructura general basada en el esquema de Análisis de Decisión. Posteriormente explicaremos cada una de sus fases e ilustraremos su aplicación a un problema de EIIA real en Cuba. Por último, presentaremos la extensión del modelo propuesto, para el tratamiento de información difusa dudosa con el objetivo de mejorar la flexibilidad de nuestro modelo y facilitar a los expertos la expresión de sus preferencias mediante términos complejos que se asemejen a su vocabulario habitual en situaciones donde duden entre varios términos lingüísticos para expresar sus preferencias respecto a los impactos ambientales.

4.1. Modelo de Evaluación de la Importancia del Impacto Ambiental con Información Heterogénea

En la Introducción de esta memoria se ha indicado como limitación en los métodos tradicionales EIIA, la incapacidad para modelar de forma adecuada la incertidumbre en la EIIA y para tratar la información heterogénea, debido a que se restringen al uso de escalas numéricas para todos los tipos de criterios ya sean cualitativos o cuantitativos. Para solucionar esta dificultad, apostando por la obtención de resultados comprensibles, en esta sección se presenta un nuevo *Modelo de Evaluación de la Importancia del Impacto Ambiental con Información Heterogénea (MH-EIIA)* basado en la fusión lingüística utilizando el Modelo de Representación 2-tupla descrito en la Sección 3.1.2.

4.1.1. Esquema General

Para poder realizar el proceso de EIIA en una forma racional y bien organizada, el MH-EIIA se estructura siguiendo las fases del proceso general de Análisis de

Decisión [48] presentado en la Figura 2.8 de esta memoria. El esquema general del MH-EIIA, tal y como se muestra en la Figura 4.1, consta de tres fases principales:

- 1) Definición del Marco de Heterogéneo de Evaluación.
- 2) Recopilación de Preferencias.
- 3) Evaluación de Alternativas.

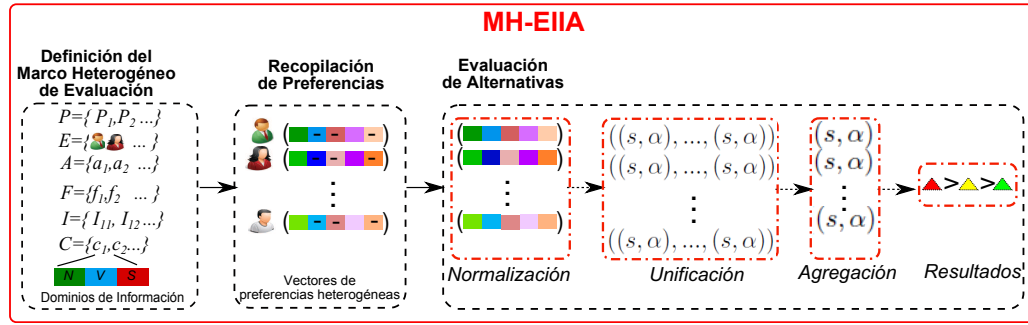


Figura 4.1: Esquema general del MH-EIIA

Como los criterios propuestos por diferentes autores difieren en número como en carácter, un marco adecuado de EIIA debe permitir la recopilación de esa información heterogénea dependiendo de la naturaleza de estos criterios. Así, en la primera fase de nuestro modelo se especifica la estructura y la representación de los elementos del problema y los dominios de información en los que los expertos proporcionarán sus preferencias sobre cada criterio para cada impacto. Tales preferencias se recogen en la segunda fase.

La tercera fase lleva a cabo los procesos de Computación con Palabras para obtener los valores de importancia de cada una de las alternativas evaluadas, ya sean los factores, acciones, impactos y del proyecto en general. Siguiendo el modelo de unificación presentado en la Sección 3.1.2, la información heterogénea es unificada en un dominio lingüístico 2-tupla común. A continuación, la información lingüística se agrega en un proceso de múltiples etapas para obtener los diferentes valores de importancia que se comparan para obtener una valoración final de los impactos, factores y acciones. Todas las fases se describen en detalle en las siguientes subsecciones.

4.1.2. Definición del Marco Heterogéneo de Evaluación

Recordemos que en esta memoria, nos acercamos a la EIHA desde una perspectiva técnica, por lo que nos concentramos únicamente en la etapa de “Evaluación de la Importancia” de un proceso total de EIA como el ilustrado en la Figura 2.1. De esta forma, como se muestra en la Figura 4.2, nuestro marco en el MH-EIHA recibe como entrada los resultados del Análisis del Proyecto, el Inventario Medioambiental y la Identificación de los Impactos Potenciales, donde se han identificado los elementos de nuestro problema de EIHA.

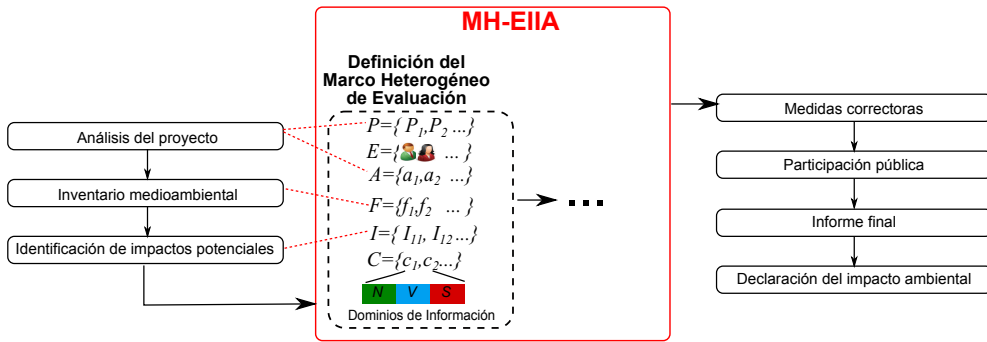


Figura 4.2: MH-EIHA en el proceso general de EIHA

En la Definición del Marco de Heterogéneo de Evaluación se declaran los elementos del problema de EIHA:

- $\mathfrak{P} = \{P_r | r \in (1, \dots, v)\}$ es el conjunto de proyectos a evaluar. Para mayor simplicidad en la presentación del modelo, en lo adelante nos referiremos a la evaluación de un único proyecto, $\mathfrak{P} = \{P_1\}$.
- $A = \{a_j | j \in (1, \dots, n)\}$ es el conjunto de acciones ejecutadas durante el proyecto evaluado.
- $F = \{f_i | i \in (1, \dots, m)\}$ es el conjunto de factores ambientales afectados cuya importancia o peso está dada por el vector $W^f = (w_i^f | i \in (1, \dots, m)), w_i^f \in [0, 1]$ con $\sum_{i=1}^m w_i^f = 1$.
- $I = \{I_{ij} | i \in \{1, \dots, m\}, j \in \{1, \dots, n\}\}$, es el conjunto de impactos ambientales. Cada impacto I_{ij} representa el factor medioambiental (f_i) impactado y la acción (a_j) que lo causa.

- $U = \{u_{ij} | i \in \{1, \dots, m\}, j \in \{1, \dots, n\}\}$, $u_{ij} \in \{-1, 1\}$ es el conjunto que representa la naturaleza de los impactos del conjunto I , donde el valor -1 indica que el impacto será negativo mientras que 1 indica que el impacto será positivo.
- $E = \{e_k | k \in (1, \dots, q)\}$ es el conjunto de expertos que evalúan los impactos medioambientales de acuerdo a,
- $C = \{c_h | h \in (1, \dots, p)\}$, que es el conjunto de criterios cuyos pesos están dados por el vector $W^c = (w_h^c | h \in (1, \dots, p))$, $w_h^c \in [0, 1]$ donde $\sum_{h=1}^p w_h^c = 1$.
- Como los criterios representan diferentes dimensiones de un impacto, pueden entrar en conflicto entre sí [192] y es necesaria la división de C en dos subconjuntos: C^1 con los criterios de beneficio y C^2 con los criterios de costo. Eso significa que para los criterios de beneficio, el experto prefiere tener un valor máximo entre las alternativas, mientras que para los criterios de costo, el experto prefiere tener un valor mínimo entre las alternativas. Además $C = C^1 \cup C^2$ y $C^1 \cap C^2 = \phi$ donde ϕ , es un conjunto vacío.
- x_{ij}^{hk} representa la preferencia del experto $e_k \in E$ sobre el impacto I_{ij} de acuerdo al criterio $c_h \in C$. Cada preferencia podrá ser dada a través de valores en $O = \{N, V, S\}$ que es el conjunto de los dominios de información que ya hemos definido en el apartado 2.2.2.

Además, dependiendo de los criterios de selección se podrá emplear un dominio específico de acuerdo con la esencia del criterio.

4.1.3. Recopilación de Preferencias

Una vez definido el Marco Heterogéneo de Evaluación, las valoraciones de los expertos son recolectadas. Cada experto provee sus preferencias a través de vectores de preferencias $X_{ij}^k = (x_{ij}^{1k}, \dots, x_{ij}^{pk})$ que pueden registrarse como muestra la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Preferencias heterogéneas de los expertos

Experto	Criterio	I_{11}	$\dots$	I_{mn}
e_1	c_1	x_{11}^{11}	$\dots$	x_{mn}^{11}
	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$
	c_p	x_{11}^{p1}	$\dots$	x_{mn}^{p1}
$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$	$\vdots$
e_q	c_1	x_{11}^{1q}	$\dots$	x_{mn}^{1q}
	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$
	c_p	x_{11}^{pq}	$\dots$	x_{mn}^{pq}

4.1.4. Evaluación de Alternativas

La fase de Evaluación de Alternativas es fundamental en el MH-EIIA porque en ella, las preferencias heterogéneas recopiladas, se sintetizan en valores de importancia mediante procesos de Computación con Palabras. Para ello, seguimos los cuatro pasos que se presentan en la Figura 4.1:

- A) Normalización.
- B) Unificación.
- C) Agregación Multietapa.
- D) Resultados.

En primer lugar la información heterogénea se normaliza con el fin de eliminar los conflictos de costo/beneficio. En segundo lugar, la información se unifica en un dominio común para facilitar posteriormente la agregación de las preferencias para obtener los valores lingüísticos de importancia para los impactos, factores, acciones, así como la importancia global del proyecto. Por último, estos valores son utilizados para ordenar descendientemente las alternativas anteriores como resultado final. A continuación explicamos cada uno de los pasos con mayor detalle.

4.1.4.1. Normalización

Este paso consiste en analizar los conflictos costo/beneficio de los criterios, de tal manera que a partir de las preferencias recopiladas, x_{ij}^{hk} , obtendremos las preferencias normalizadas $\bar{x}_{ij}^{hk}$ utilizando las ecuaciones definidas a continuación (ver Tabla 4.2).

- Para valores numéricos $x_{ij}^{hk} \in [0, 1]$:

$$\bar{x}_{ij}^{hk} = \begin{cases} x_{ij}^{hk} & \text{si } c_h \in C^1 \\ 1 - x_{ij}^{hk} & \text{si } c_h \in C^2 \end{cases} \quad (4.1)$$

- Para valores intervalares $x_{ij}^{hk} \in V([0, 1])$:

$$\bar{x}_{ij}^{hk} = \begin{cases} [a_{ij}^{hk}, b_{ij}^{hk}] & \text{si } c_h \in C^1 \\ [1 - b_{ij}^{hk}, 1 - a_{ij}^{hk}] & \text{si } c_h \in C^2 \end{cases} \quad (4.2)$$

- Para valores lingüísticos $x_{ij}^{hk} \in S$:

$$\bar{x}_{ij}^{hk} = \begin{cases} s_{ij}^{hk} & \text{si } c_h \in C^1 \\ \text{Neg}(s_{ij}^{hk}) & \text{si } c_h \in C^2 \end{cases} \quad (4.3)$$

donde Neg es un operador de negación [211] tal que $\text{Neg}(s_i) = s_{g-i}$.

Ejemplo 1 Así, por ejemplo, para diferentes criterios de coste, supongamos que un experto emite una preferencias en distintos dominios.

- Para un valor numérico $x = 0.40$, el valor normalizado es $\bar{x} = 1 - 0.40 = 0.60$.
- Para un valor intervalar $x = [0.40, 0.55]$, el valor normalizado es $\bar{x} = [1 - 0.55, 1 - 0.40] = [0.45, 0.60]$.
- Para un valor lingüístico $x = \text{Bajo} \in S$ siendo S el CTL de la Figura 4.3, el valor normalizado es $\bar{x} = \text{Neg}(\text{Bajo}) = \text{Neg}(s_1) = s_{4-1} = s_3 = \text{Alto}$.

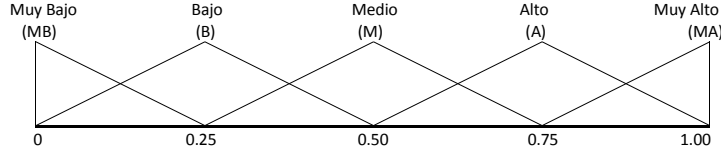


Figura 4.3: CTL de cinco términos simétricamente distribuidos

Tabla 4.2: Preferencias heterogéneas normalizadas

Experto	Criterio	I_{11}	$\dots$	I_{mn}
e_1	c_1	$\bar{x}_{11}^{11}$	$\dots$	$\bar{x}_{mn}^{11}$
	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$
	c_p	$\bar{x}_{11}^{p1}$	$\dots$	$\bar{x}_{mn}^{p1}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$
e_q	c_1	$\bar{x}_{11}^{1q}$	$\dots$	$\bar{x}_{mn}^{1q}$
	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$
	c_p	$\bar{x}_{11}^{pq}$	$\dots$	$\bar{x}_{mn}^{pq}$

4.1.4.2. Unificación

Para unificar las preferencias heterogéneas se emplea el método propuesto por Herrera et al [86], descrito en el apartado 3.1.2. Los valores lingüísticos en 2-tuplas $(s_a, \alpha_a)_{ij}^{hk}$ son obtenidos como sigue (ver Tabla 4.3):

$$\tilde{x}_{ij}^{hk} = (s_a, \alpha_a)_{ij}^{hk} = \begin{cases} \chi \left(T_{NST}(\bar{x}_{ij}^{hk}) \right) & \text{si } \bar{x}_{ij}^{hk} \in N \\ \chi \left(T_{VST}(\bar{x}_{ij}^{hk}) \right) & \text{si } \bar{x}_{ij}^{hk} \in V \\ \chi \left(T_{SST}(\bar{x}_{ij}^{hk}) \right) & \text{si } \bar{x}_{ij}^{hk} \in S \end{cases} \quad (4.4)$$

Ejemplo 2 Supongamos un problema donde hemos obtenido los valores normalizados del ejemplo anterior y que necesitamos transformar cada uno en 2-tupla teniendo como CBTL un CTL de siete términos simétricamente distribuidos. Las transformaciones se realizan como sigue (ver Figura 4.4):

1. Transformación en conjuntos difusos:

Tabla 4.3: Preferencias unificadas en 2-tuplas lingüísticas

Experto	Criterio	I_{11}	$\dots$	I_{mn}
e_1	c_1	$(s_a, \alpha_a)_{11}^{11}$	$\dots$	$(s_a, \alpha_a)_{mn}^{11}$
	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$
	c_p	$(s_a, \alpha_a)_{11}^{p1}$	$\dots$	$(s_a, \alpha_a)_{mn}^{p1}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$
e_q	c_1	$(s_a, \alpha_a)_{11}^{1q}$	$\dots$	$(s_a, \alpha_a)_{mn}^{1q}$
	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$
	c_p	$(s_a, \alpha_a)_{11}^{pq}$	$\dots$	$(s_a, \alpha_a)_{mn}^{pq}$

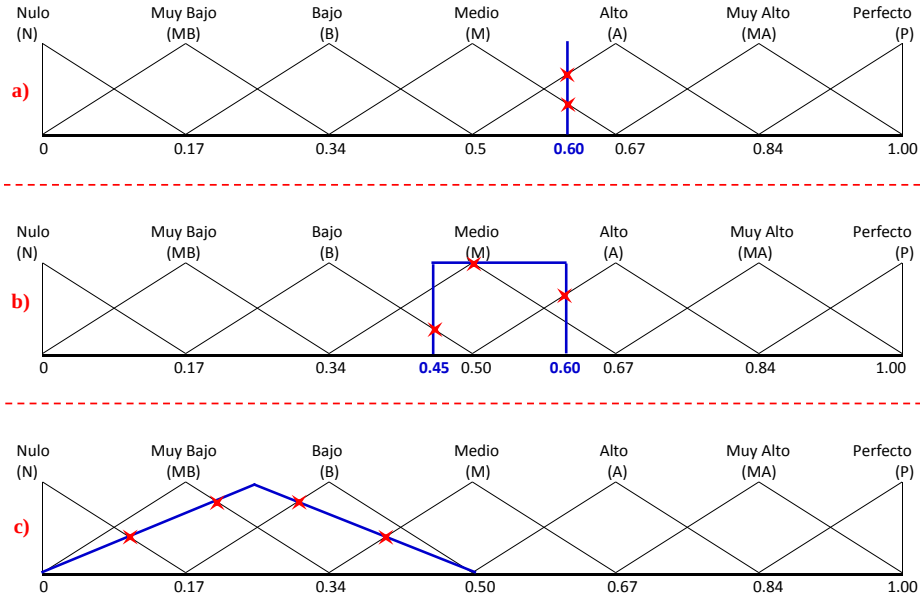


Figura 4.4: Transformación de valores en S^7

a) Para $\bar{x} = 0.60$: $T_{NS_T}(0.60) =$
 $\{(s_0, 0), (s_1, 0), (s_2, 0), (s_3, 0.41), (s_4, 0.59), (s_5, 0), (s_6, 0)\}$

b) Para $\bar{x} = [0.45, 0.60]$: $T_{VS_T}([0.45, 0.60]) =$
 $\{(s_0, 0), (s_1, 0), (s_2, 0.31), (s_3, 1.00), (s_4, 0.59), (s_5, 0), (s_6, 0)\}$

c) Para $\bar{x} = Alto$: $T_{SS_T}(Alto) =$

$$\{(s_0, 0.39), (s_1, 0.85), (s_2, 0.85), (s_3, 0.39), (s_4, 0), (s_5, 0), (s_6, 0)\}$$

2. Transformación en 2-tuplas:

a) $\chi(\{(s_0, 0), (s_1, 0), (s_2, 0), (s_3, 0.41), (s_4, 0.59), (s_5, 0), (s_6, 0)\}) =$

$$\chi\left(\frac{3 \times 0.41 + 4 \times 0.59}{0.41 + 0.59}\right) = \Delta(3.59) = (s_4, -0.41) = (Muy\ Alto, -0.41)$$

b) $\chi(\{(s_0, 0), (s_1, 0), (s_2, 0.31), (s_3, 1.00), (s_4, 0.59), (s_5, 0), (s_6, 0)\}) =$

$$\chi\left(\frac{2 \times 0.31 + 3 \times 1.00 + 4 \times 0.59}{0.31 + 1.00 + 0.49}\right) = \Delta(2.21) = (s_2, 0.21) = (Bajo, 0.21)$$

c) $\chi(\{(s_0, 0.39), (s_1, 0.85), (s_2, 0.85), (s_3, 0.39), (s_4, 0), (s_5, 0), (s_6, 0)\}) =$

$$\chi\left(\frac{0 \times 0.39 + 1 \times 0.85 + 2 \times 0.85 + 3 \times 0.39}{0.39 + 0.85 + 0.85 + 0.39}\right) = \Delta(1.5) = (s_2, -0.50) = (Bajo, -0.50)$$

4.1.4.3. Agregación Multietapa

Después de obtener valores homogéneos expresados mediante 2-tuplas lingüísticas, es necesario generar una evaluación colectiva lingüística para cada alternativa (impactos, factores, acciones y proyectos). Para ello, es evidente la necesidad de emplear modelos computacionales lingüísticos que permiten operar con este tipo de información con el fin de obtener resultados precisos y proporcionar una representación que facilite la interpretación de los mismos. Para alcanzar ambos objetivos, se lleva a cabo un proceso de agregación de múltiples etapas incluyendo los pasos ilustrados en la Figura 4.5.

En primer lugar un valor colectivo se obtiene para cada criterio de cada impacto, mediante la agregación de las preferencias de los expertos unificadas en 2-tupla. En segundo lugar, estos valores son agregados para obtener el valor de importancia para cada impacto, que posteriormente es ajustado en un nuevo término lingüístico en una escala lingüística bipolar que permite distinguir la importancia de los impactos positivos de los negativos. Estos valores son agregados para producir finalmente los valores de importancia para los factores y acciones así como la importancia global del proyecto¹.

1. Calcular el valor colectivo de cada criterio para cada impacto.

¹Estas agregaciones se realizan mediante los operadores de agregación definidos en el modelo computacional para 2-tupla lingüística [82] revisado en el Apéndice A.

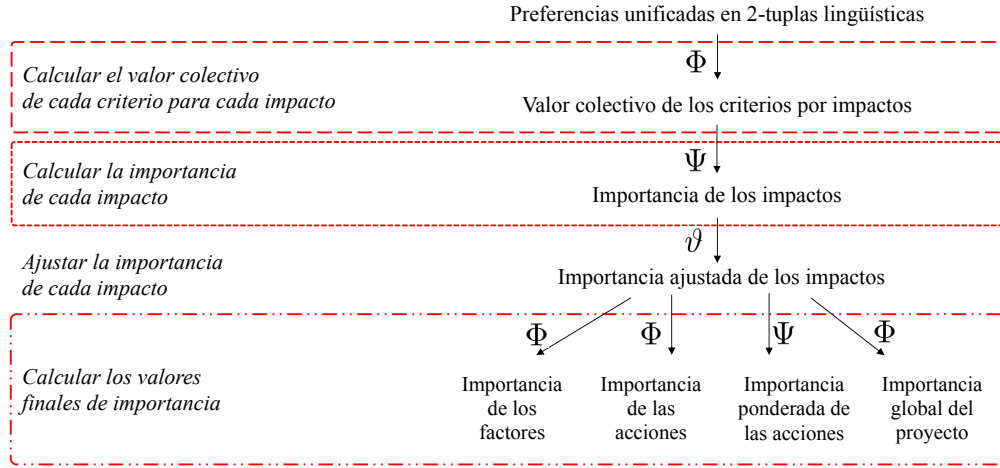


Figura 4.5: Proceso de Agregación Multietapa: pasos, operadores y valores obtenidos en cada paso

Debido a que hemos modelado la EIHA como un problema de TDMC que involucra múltiples expertos, las preferencias de todos los expertos para cada criterio se agregan para obtener un valor colectivo de cada criterio para cada impacto evaluado.

El valor colectivo de un criterio para cada impacto, es un valor lingüístico en 2-tuplas (ver Tabla 4.4) que se denota $(s_b, \alpha_b)_{ij}^h$ y que se obtiene mediante un operador para 2-tuplas lingüísticas como los descritos en el Apéndice A.

$$(s_b, \alpha_b)_{ij}^h = \Phi \left((s_a, \alpha_a)_{ij}^{h1}, \dots, (s_a, \alpha_a)_{ij}^{hp} \right) \quad (4.5)$$

Tabla 4.4: Valores colectivos de los criterios

Criterio	I_{11}	$\dots$	I_{mn}
c_1	$(s_b, \alpha_b)_{11}^1$	$\dots$	$(s_b, \alpha_b)_{mn}^1$
$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$
c_p	$(s_b, \alpha_b)_{11}^p$	$\dots$	$(s_b, \alpha_b)_{mn}^p$

2. Calcular la importancia de cada impacto.

Después de tener el valor colectivo para cada criterio de evaluación, se calcula la importancia para cada impacto (s_r, α_r) (ver Tabla 4.5), utilizando un operador para 2-tupla con el vector de pesos W^f , como se indica a continuación:

$$(s_r, \alpha_r)_{ij} = \Psi \left((s_b, \alpha_b)_{ij}^1, \dots, (s_b, \alpha_b)_{ij}^p \right) \quad (4.6)$$

Tabla 4.5: Importancia de los impactos

I_{11}	$\dots$	I_{mn}
$(s_r, \alpha_r)_{11}$	$\dots$	$(s_r, \alpha_r)_{mn}$

3. Ajustar la importancia de cada impacto.

Debido a que un valor lingüístico $(s_r, \alpha_r)_{ij}$ no permite representar si el impacto evaluado será beneficioso o perjudicial, es necesario ajustar estos valores de importancia con el fin de especificar de forma integrada si un impacto I_{ij} tiene una naturaleza negativa o positiva. Hemos llamado a este procedimiento “ajustar la importancia de un impacto”.

En problemas reales de EIIA, pudiéramos enfrentar impactos diferentes con la misma extensión, intensidad y/o persistencia (entre otros criterios), pero con naturaleza o signo contrario, por lo tanto, esto demanda una actitud diferente para tratar esta peculiaridad.

Al analizar la naturaleza de un impacto lógicamente surge la idea de dos nuevos valores (uno positivo y otro negativo) en lugar del valor único y original de importancia [15, 49]. En el contexto lingüístico, esto implica ampliar el universo del discurso para representar valores lingüísticos de importancia positivos y negativos, de tal forma que, a partir de un conjunto inicial términos lingüísticos S_T se genere un nuevo conjunto de términos lingüísticos S'_T con cardinalidad $g' + 1$, siendo $g' = 2 \cdot g - 1$. Es importante señalar que S_T , no es más que el CBTL seleccionado como el dominio común para la *Unificación* en la sección 4.1.4.2.

Este procedimiento puede hacerse siguiendo un proceso similar a la construcción de una jerarquía lingüística [85, 132], es decir, por un lado, se preservan todos los antiguos puntos modales de las funciones de pertenencia de cada término lingüístico de S_T a S'_T y por otro lado, se realizan transiciones suaves entre S_T y S'_T agregando un nuevo término lingüístico entre cada par de términos pertenecientes a S_T (para más detalles, consultar el Apéndice A).

$S'_T = \{s'_0, \dots, s'_{g'}\}$ puede ser visto además como una escala bipolar [75] donde el término $s'_{g'/2}$ representa un valor de importancia indiferente y los términos de la izquierda y de la derecha de la misma, representan valores de importancia de impactos negativos y positivos, respectivamente. De esta manera intuitiva se obtienen valores lingüísticos que representan no sólo el significado sino que también refleja su naturaleza y además son fácilmente contrastables usando el operador de comparación para 2-tupla [82], sin la necesidad de definir nuevas leyes de comparación para diferentes y opuestos dominios lingüísticos de expresión.

El procedimiento anterior permite obtener la sintaxis del nuevo CTL S'_T . Para generar la semántica de S'_T , se define la función de transformación ϑ :

Sean S_T y S'_T dos CTL con cardinalidades $g + 1$ y $g' + 1$ respectivamente, tal que $g' = 2 \cdot g$; y considerando el modelo de representación 2-tupla lingüística. La función de transformación $\vartheta : S_T \rightarrow S'_T$, de una 2-tupla (s, α) en S_T a S'_T , de acuerdo a la naturaleza u_{ij} del impacto I_{ij} se define como:

Definición 5

$$\vartheta \left((s, \alpha)_{ij} \right) = \begin{cases} \Delta^{-1} \left(\Delta(s, \alpha)_{ij} + \frac{g'}{2} \right) & \text{si } u_{ij} = 1 \\ \Delta^{-1} \left(\frac{g'}{2} - \Delta(s, \alpha)_{ij} \right) & \text{si } u_{ij} = -1 \end{cases} \quad (4.7)$$

La Figura 4.6 ilustra el desempeño de la función de ajuste ϑ .

En resumen, en este paso cada valor $(s_r, \alpha_r)_{ij}$ será ajustado como sigue:

$$(s_v, \alpha_v)_{ij} = \vartheta \left((s_r, \alpha_r)_{ij} \right) \quad (4.8)$$

4. Calcular los valores finales de importancia.

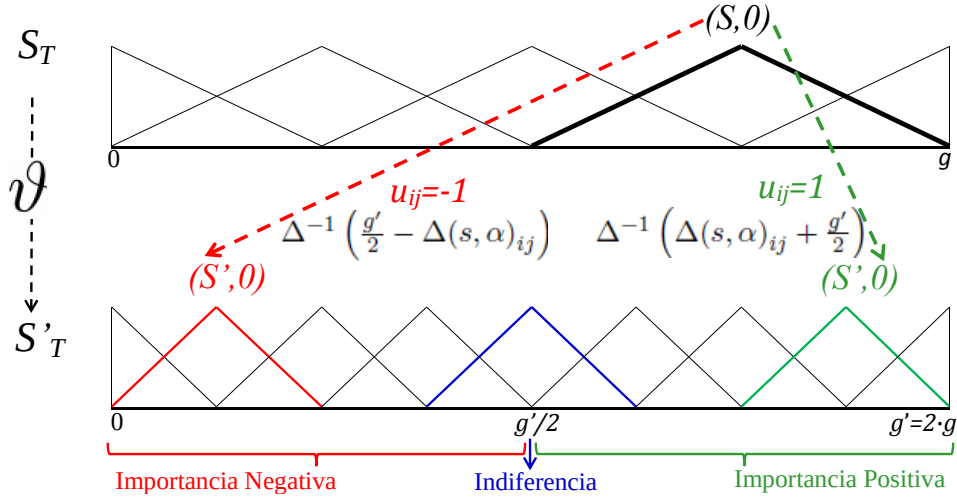


Figura 4.6: Desempeño de la función de transformación ϑ

El objetivo fundamental de la Agregación Multietapa es generar una valoración colectiva para cada factor ambiental, acción y en general del proyecto. Proponemos cumplir este propósito empleando nuevamente operadores de agregación para 2-tuplas, que permiten generar los siguientes indicadores:

■ **Importancia de cada factor:**

Representa la importancia de un factor ambiental debido a los impactos causados por todas las acciones que interactúan con él, por lo que se obtiene a través de la agregación de los valores de importancia ajustados de los impactos relacionados con el factor.

$$(s_z, \alpha_z)_i = \Phi\{(s_v, \alpha_v)_{i1}, \dots, (s_v, \alpha_v)_{in}\} \quad (4.9)$$

■ **Importancia de cada acción:**

Representa la importancia de los impactos causados por una acción sobre los factores ambientales, por lo que se obtiene mediante la agregación de los valores de importancia ajustados de los impactos causados por esta acción.

$$(s_y, \alpha_y)_j = \Phi\{(s_v, \alpha_v)_{1j}, \dots, (s_v, \alpha_v)_{mj}\} \quad (4.10)$$

■ **Importancia ponderada de cada acción:**

Representa la importancia de los impactos causados por una acción sobre los factores ambientales pero también teniendo en cuenta la importancia de cada factor afectado, por lo que se obtiene mediante una agregación ponderada de los valores ajustados de importancia de los impactos causados por esta acción, utilizando el vector de ponderación W^f que permite obtener valores de importancia inferiores para las acciones más agresivas que afectan los factores más importantes.

$$(s_f, \alpha_f)_j = \Psi\{(s_v, \alpha_v)_{1j}, \dots, (s_v, \alpha_v)_{mj}\} \quad (4.11)$$

■ **Importancia global del proyecto:**

Representa la importancia general de los impactos causados por todas las acciones sobre todos los factores, es decir, el total de los efectos posibles causados por el proyecto que el ambiente experimentará.

$$(s_g, \alpha_g) = \Phi\{(s_v, \alpha_v)_{11}, \dots, (s_v, \alpha_v)_{mn}\} \quad (4.12)$$

El valor global de importancia permite evaluar un proyecto individual sin necesidad de compararlo o considerar otras alternativas, debido a que los resultados finales están expresados en la escala ajustada S'_T que representa valores de importancia positivos y negativos.

Los valores obtenidos en las etapas de 3 y 4, pueden resumirse como muestra la Tabla 4.6.

Tabla 4.6: Valores finales de importancia

Factor \ Acción				Imp. del factor
	a_1	$\dots$	a_n	
f_1	$(s_v, \alpha_v)_{11}$	$\dots$	$(s_v, \alpha_v)_{1n}$	$(s_z, \alpha_z)_1$
$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$	$\vdots$
f_m	$(s_v, \alpha_v)_{m1}$	$\dots$	$(s_v, \alpha_v)_{mn}$	$(s_z, \alpha_z)_m$
Imp. de la acción	$(s_y, \alpha_y)_1$	$\dots$	$(s_y, \alpha_y)_n$	
Imp. Ponderada de la acción	$(s_f, \alpha_f)_1$	$\dots$	$(s_f, \alpha_f)_n$	
Imp. Global del proyecto				(s_g, α_g)

4.1.4.4. Resultados

Dado que los valores de importancia se expresan en 2-tuplas lingüísticas, las reglas de comparación de 2-tuplas [82], son aplicadas para obtener conjuntos ordenados como parte de la solución del problema:

1. Ranking de impactos según el orden descendente de los valores $(s_v, \alpha_v)_{ij}$.
2. Ranking de factores según el orden descendente de los valores $(s_z, \alpha_z)_i$.
3. Ranking de factores según el orden descendente de los valores $(s_y, \alpha_y)_j$.
4. Ranking de factores según el orden descendente de los valores $(s_f, \alpha_f)_j$.
5. Ranking de alternativas para un mismo proyecto según el orden descendente de los valores (s_g, α_g) .

4.2. Aplicación del MH-EIIA: Caso de Estudio *Reconversión Tecnológica de la Planta de Cloro Sosa de Sagua la Grande*

Una vez definido el MH-EIIA, en esta segunda parte del capítulo presentaremos su aplicación a un problema de EIIA en Cuba. Para comprender el entorno del problema, primero presentaremos una breve reseña de los elementos en los cuales se fundamenta la política medioambiental cubana. Posteriormente nos referiremos a la entidad evaluadora, que en este caso ha sido el Centro de Química Aplicada (CEQA) y al proyecto en cuestión *Reconversión Tecnológica de la Planta de Cloro Sosa de Sagua la Grande*. Por último explicaremos la resolución del caso de estudio mediante el modelo propuesto.

4.2.1. Política Ambiental Cubana

La protección del medio ambiente constituye un factor relevante para el aseguramiento de la disponibilidad de los recursos naturales indispensables para la satisfacción de las necesidades básicas de la población en Cuba. El Artículo 27 de la Constitución de la República postula que: “El Estado protege el medio ambiente y los recursos naturales del país. Reconoce su estrecha vinculación con el

desarrollo económico y social sostenible para hacer más racional la vida humana y asegurar la supervivencia, el bienestar y la seguridad de las generaciones actuales y futuras” [55]. La Ley 33 “De Protección del Medio Ambiente y el Uso Racional de los Recursos Naturales”, del 10 de enero de 1981 y el Decreto-Ley 118, de “Estructura, Organización y Funcionamiento del Sistema Nacional de Protección del Medio Ambiente y su Órgano Rector”, de 18 de enero de 1990, representaron la voluntad cubana de lograr un ordenamiento jurídico nacional en esta esfera y los principios de una política ambiental. La participación de Cuba en las Conferencias de las Naciones Unidas sobre medio ambiente y desarrollo en 1992 y las demandas de las condiciones de desarrollo económico y social de entonces, provocaron cambios de estructuras para la gestión ambiental, acordes con los avances en materia ambiental, en el ámbito nacional e internacional, y las exigencias de la protección del medio ambiente y la consecución del desarrollo sostenible. Así en 1997, se aprueba la Ley 81 “De Medio Ambiente” que tiene como objeto establecer los principios que rigen la política ambiental y las normas básicas para regular la gestión ambiental del Estado y las acciones de los ciudadanos y la sociedad en general, a fin de proteger el medio ambiente y contribuir a alcanzar los objetivos del desarrollo sostenible del país [56].

En su Capítulo IV, la Ley 81 establece el procedimiento para la realización de la Evaluación de Impacto Ambiental y comprende los siguientes pasos [56]:

1. La solicitud de licencia ambiental.
2. El estudio de impacto ambiental, en los casos en que proceda.
3. La evaluación propiamente dicha, a cargo del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA).
4. El otorgamiento o no de la licencia ambiental.

En los artículos 24, 25 y 26 de la Ley 81, se plantea que toda actividad susceptible de producir efectos significativos sobre el medio ambiente o que requiera un debido control a los efectos del cumplimiento de lo establecido por la legislación ambiental vigente, estará sujeta al otorgamiento de una licencia ambiental por el CITMA, de conformidad con lo que al respecto estipule ese organismo, quien establecerá así mismo los tipos y modalidades de dicha licencia y que el otorgamiento de la licencia ambiental está sujeta al pago de los gravámenes que al respecto se

establezcan y no exime al licenciatario de la obligación de proteger de manera efectiva el medio ambiente, ni de las responsabilidades administrativas, civiles y penales en que pueda incurrir, además que los programas, obras o actividades que no cuenten con la licencia ambiental o no cumplan las exigencias y controles que en ésta se fijen, podrán ser suspendidas temporal o definitivamente por el CITMA sin perjuicio de que se hagan efectivas las responsabilidades correspondientes [56].

4.2.2. Descripción del Problema de EIIA

- **La entidad evaluadora: CEQA**

El CEQA es uno de los centros adscritos a la Facultad de Química Farmacia de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Tiene la misión de investigar en la temática del riesgo tecnológico y ambiental, y en el desarrollo y aplicación de métodos avanzados en los tratamientos de residuos tóxicos, como vías para aumentar la seguridad tecnológica y ambiental en los procesos químicos. El CEQA presta servicios científico-técnicos de análisis químicos y físico-químicos de residuos de procesos industriales y de servicios, así como, de asesoría y consultoría en temas relacionados con su investigación.

El CEQA es una de las entidades facultadas en Cuba para la realización de evaluaciones de impactos ambientales, en representación del Grupo de Estudios de Medio Ambiente del Ministerio de Educación Superior. Sus especialistas brindan este servicio a las diferentes empresas e instituciones cubanas que lo requieran, haciendo uso de la metodología cualitativa propuesta por Conesa [49].

En el proceso de valoración en el CEQA, los expertos se reúnen y llegan a un consenso de forma verbal, sobre la evaluación de cada uno de los símbolos, registrándolo en documentos Excel, provocando dispersión de la información y dificultad a la hora de realizar estudios comparativos. La evaluación de todos los símbolos es realizada con valores numéricos, disminuyendo nivel de representatividad del conocimiento de los expertos y sin tener en cuenta la naturaleza de los mismos, y además con resultados finales difíciles de interpretar por los decisores. Las opiniones de los expertos que participan en la EIIA se confrontan de manera verbal para llegar a la valoración colectiva de cada criterio para cada impacto, sin que medie un método formal y

no disponen de ninguna herramienta que centralice y guíe el proceso. Los problemas detectados en el proceso de EIIA realizado en el CEQA refuerzan las limitaciones detectadas en los métodos tradicionales anteriormente explicadas.

■ **El proyecto evaluado: Reconversión Tecnológica de la Planta de Cloro Sosa de Sagua la Grande**

La Empresa Electroquímica se propone realizar la inversión del proyecto *Reconversión Tecnológica de la Planta de Cloro Sosa* en el municipio de Sagua La Grande, el cual tiene como objetivos:

- Garantizar el suministro de cloro y sus derivados a sectores sensibles de la economía del país, en un escenario con restricciones en el suministro de mercurio y materiales auxiliares para su uso y en el tratamiento de residuales generados por el mismo, conllevando un incremento significativo en el precio.
- Sustituir de forma total la planta actual con la tecnología de mercurio con más de 30 años de explotación, eliminando así los riesgos de contaminación por mercurio al medio ambiente y a la salud humana, adquiriendo una planta con tecnología de membrana.
- Disminuir los costos de producción actuales, al eliminar los elevados gastos en el tratamiento y confinación de residuales, monitoreo ambiental, mantenimiento y recambio de equipos tecnológicos y estructuras civiles.
- Disminuir el consumo energético en el proceso productivo en aproximadamente un 30 % en comparación con la actual tecnología que representa un ahorro de 12 GWh/año.

Para la identificación y evaluación de impactos, el grupo de trabajo evaluador, analizó los principales elementos de la información obtenida relacionada con las características del proyecto y el estado actual del medio ambiente. Con respecto al análisis del proyecto, los expertos realizaron un estudio de los objetivos y justificación económica del mismo, así como de otros aspectos que incluyen magnitud de la obra en términos económicos, descripción

de las etapas del proyecto, materia prima, características, recursos naturales a utilizar, productos finales, aguas residuales y tratamiento de las mismas, descripción del proceso tecnológico, señalando etapas del proceso, equipamiento, capacidades, entre otros. Respecto al estado actual del medio ambiente se analizaron criterios relacionados con geología, geomorfología, tipo de suelo, características de las aguas superficiales y subterráneas, descripción del clima, niveles de contaminación de las aguas y del aire, características del paisaje, vegetación y fauna. Se informaron igualmente las características fundamentales de la comunidad estudiada, así como de las impresiones recibidas por el grupo evaluador en sus encuestas y contactos con la población y la Dirección Política Administrativa del Consejo Popular respecto a las expectativas del proyecto. El proyecto consta de tres fases: construcción, funcionamiento y cierre de la planta pero para el estudio se consideró la EIIA de la fase de construcción. La evaluación original se realizó tomando como herramienta la Guía Metodológica de Evaluación de Impactos Ambientales de Conesa [49].

4.2.3. Resolución del Problema de EIIA

A continuación, presentaremos la implementación del MH-EIIA en el proyecto descrito, para lo cual explicaremos las tareas realizadas y los resultados obtenidos en cada uno de los pasos del modelo.

4.2.3.1. Definición del Marco Heterogéneo de Evaluación

■ Acciones

Fueron identificadas por parte de los expertos las siguientes acciones impactantes:

- a_1 Desbroce y movimiento de tierra.
 - a_2 Pavimentación y recubrimiento de superficies.
 - a_3 Emisión de gases y polvo.
 - a_4 Emisión de residuos sólidos
 - a_5 Tránsito de vehículos.
 - a_6 Transporte de materiales y maquinarias.
-

- a_7 Presencia de personal ajeno.
- a_8 Construcción y ampliación de redes eléctricas.
- a_9 Emisión de ruido.
- a_{10} Construcción de canales para evitar inundaciones.

■ **Factores y sus pesos**

Fueron identificados ocho factores del entorno como susceptibles a recibir impactos con pesos dados por el vector

$$W^f = (0.12, 0.12, 0.075, 0.075, 0.12, 0.12, 0.25, 0.12):$$

- f_1 Aire.
- f_2 Suelo y subsuelo.
- f_3 Flora.
- f_4 Fauna.
- f_5 Medio perceptual.
- f_6 Uso del territorio.
- f_7 Economía del territorio.
- f_8 Población.

■ **Criterios y sus pesos**

Los criterios y sus pesos fueron determinados según el Método de Conesa, descrito en el apartado 2.1.3.2 (ver Tabla 4.7).

■ **Impactos y su naturaleza**

A partir de las posibles interacciones factor-acción, se identificaron 66 impactos ambientales. Para su mejor ilustración, se ha utilizado la matriz cruzada de la Figura 4.7, donde los cuadros en color verde representan la existencia de un impacto positivos, los rojos impactos negativos y los blancos la ausencia de impactos.

■ **Dominios de información**

Se ha decidido, de acuerdo con los criterios seleccionados, emplear los dominios de evaluación numérico y lingüístico, es decir $O = \{N, S\}$. En cuanto al

	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}
f_1	I_{11}		I_{13}		I_{15}	I_{16}			I_{19}	I_{110}
f_2	I_{21}	I_{22}		I_{24}	I_{25}	I_{26}		I_{28}		I_{210}
f_3	I_{31}	I_{32}	I_{33}	I_{34}	I_{35}	I_{36}	I_{37}	I_{38}		I_{310}
f_4	I_{41}		I_{43}	I_{44}	I_{45}	I_{46}	I_{47}	I_{48}	I_{49}	I_{410}
f_5	I_{51}	I_{52}	I_{53}	I_{54}	I_{55}	I_{56}		I_{58}	I_{59}	I_{510}
f_6	I_{61}	I_{62}	I_{63}	I_{64}	I_{65}	I_{66}	I_{67}	I_{68}	I_{69}	I_{610}
f_7	I_{71}	I_{72}		I_{74}	I_{75}	I_{76}	I_{77}	I_{78}	I_{79}	I_{710}
f_8		I_{82}	I_{83}		I_{85}	I_{86}	I_{87}		I_{89}	I_{810}

Figura 4.7: Impactos identificados y su naturaleza

dominio lingüístico, se emplearán los CTL de 3 ó 5 términos que se muestran en la Figura 4.8. La Tabla 4.7 resume el tipo de dominio en que será evaluado cada criterio.

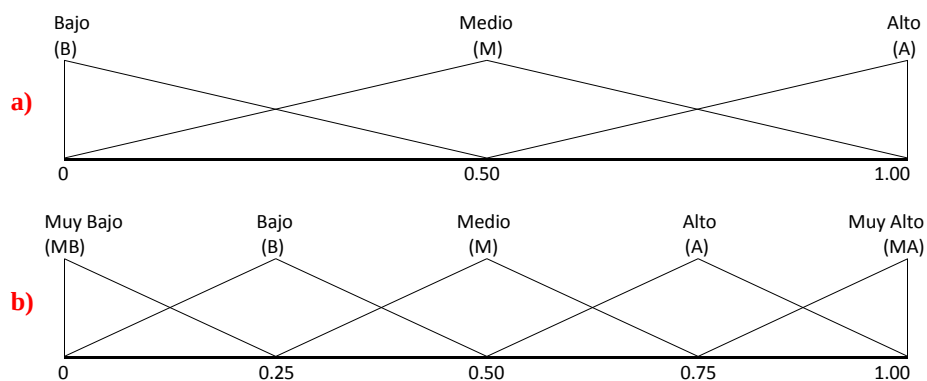


Figura 4.8: a) CTL de 3 términos y b) CTL de 5 términos

Tabla 4.7: Criterios, pesos y dominios en los que serán evaluados

Criterio	Nombre	Peso	Dominio
c_1	Intensidad	0.36	S^5
c_2	Extensión	0.24	S^5
c_3	Momento	0.08	N
c_4	Persistencia	0.04	N
c_5	Reversibilidad	0.04	N
c_6	Sinergia	0.04	S^3
c_7	Acumulación	0.04	S^3
c_8	Efecto	0.04	S^3
c_9	Recuperabilidad	0.08	S^5
c_{10}	Periodicidad	0.04	S^3

- **Expertos** En el proceso participarán tres expertos $E = \{e_1, e_2, e_3\}$ con conocimientos y demostrada experiencia en los siguientes temas:

- Caracterización económica y técnico ambiental de un proyecto.
- Estudios socioeconómicos.
- Análisis químicos
- Estudios de vegetación, fauna, suelo, agua y clima.
- Estudios geográficos, geotécnicos y geológicos.

4.2.3.2. Recopilación de Preferencias

Después de establecido el marco de trabajo, el siguiente paso consiste en recoger las preferencias heterogéneas de cada uno de los expertos que participan en la evaluación. En el Apéndice C, aparecen las valoraciones emitidas para todos los impactos pero debido a su gran número, en este apartado y en los siguientes sólo mostramos las preferencias (Tabla 4.8) y cálculos para seis de los impactos relacionados con el factor f_2 .

Tabla 4.8: Preferencias heterogéneas recopiladas

E	C	I_{21}	I_{22}	I_{24}	I_{25}	I_{26}	I_{28}
e_1	c_1	A	B	A	B	M	MB
	c_2	M	M	A	B	M	MB
	c_3	0	0	0	0	0	0
	c_4	0.83	1.00	0.67	0.17	1.00	0.50
	c_5	0.83	1.00	0.83	0	0.83	0.50
	c_6	M	B	M	B	B	B
	c_7	B	B	B	B	B	B
	c_8	A	A	M	B	B	B
	c_9	B	M	M	B	M	MB
	c_{10}	B	B	M	B	B	B
e_2	c_1	M	M	M	M	M	MB
	c_2	A	B	M	M	M	MB
	c_3	0	0	0	0	0.40	0
	c_4	1.00	0.83	1.00	0.17	0.17	0
	c_5	0.83	0.83	1.00	0	0.17	0
	c_6	M	B	M	B	B	M
	c_7	B	B	B	B	B	M
	c_8	A	A	M	B	M	B
	c_9	M	M	M	MB	M	MB
	c_{10}	B	B	M	B	B	M
e_3	c_1	M	M	M	M	M	MB
	c_2	M	B	A	M	A	M
	c_3	0	0	0	0	0	0
	c_4	1.00	0.67	1.00	0.17	0.83	0.83
	c_5	1.00	0.83	1.00	0	0.83	0.83
	c_6	M	B	M	B	B	M
	c_7	B	B	B	B	B	M
	c_8	M	A	M	B	M	B
	c_9	B	A	B	B	B	MB
	c_{10}	M	B	M	B	M	M

4.2.3.3. Evaluación de Alternativas

Siguiendo el MH-EIIA, en esta fase las preferencias son normalizadas y unificadas en 2-tuplas lingüísticas, luego son agregadas para obtener los valores de importancia de cada uno de los elementos del problema, que finalmente son empleados para obtener los rankings finales.

4.2.3.4. Normalización

El criterio c_3 , *Momento*, es un criterio de coste por lo que es normalizado de acuerdo a la Ecuación (4.1).

4.2.3.5. Unificación

Se selecciona el CBTL para unificar la información heterogénea normalizada. En este caso, CTL de mayor granularidad es S^5 por lo que cada valor es unificado utilizando las funciones de transformación necesarias. Los resultados obtenidos pueden verse en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9: Preferencias unificadas en 2-tuplas lingüísticas

E	C	I_{21}	I_{22}	I_{24}	I_{25}	I_{26}	I_{28}
e_1	c_1	(A,0)	(B,0)	(A,0)	(B,0)	(M,0)	(MB,0.3)
	c_2	(M,0)	(M,0)	(A,0)	(B,0)	(M,0)	(MB,0.3)
	c_3	(MA,0)	(MA,0)	(MA,0)	(MA,0)	(MA,0)	(MA,0)
	c_4	(A,0.3)	(MA,0)	(A,-0.3)	(B,-0.3)	(MA,0)	(M,0)
	c_5	(A,0.3)	(MA,0)	(A,0.3)	(MB,0)	(A,0.3)	(M,0)
	c_6	(M,0)	(B,-0.3)	(M,0)	(B,-0.3)	(B,-0.3)	(M,0)
	c_7	(B,-0.3)	(B,-0.3)	(B,-0.3)	(B,-0.3)	(B,-0.3)	(B,-0.3)
	c_8	(A,0.3)	(A,0.3)	(M,0)	(B,-0.3)	(B,-0.3)	(B,-0.3)
	c_9	(B,0)	(M,0)	(M,0)	(B,0)	(M,0)	(MB,0.3)
	c_{10}	(B,-0.3)	(B,-0.3)	(M,0)	(B,-0.3)	(B,-0.3)	(B,-0.3)
e_2	c_1	(M,0)	(M,0)	(M,0)	(M,0)	(M,0)	(MB,0.3)
	c_2	(A,0)	(B,0)	(M,0)	(M,0)	(M,0)	(MB,0.3)
	c_3	(MA,0)	(MA,0)	(MA,0)	(MA,0)	(M,0.4)	(MA,0)
	c_4	(MA,0)	(A,0.3)	(MA,0)	(B,-0.3)	(B,-0.3)	(MB,0)
	c_5	(A,0.3)	(A,0.3)	(MA,0)	(MB,0)	(B,-0.3)	(MB,0)
	c_6	(M,0)	(B,-0.3)	(M,0)	(B,-0.3)	(B,-0.3)	(M,0)
	c_7	(B,-0.3)	(B,-0.3)	(B,-0.3)	(B,-0.3)	(B,-0.3)	(M,0)
	c_8	(A,0.3)	(A,0.3)	(M,0)	(B,-0.3)	(M,0)	(B,-0.3)
	c_9	(M,0)	(M,0)	(M,0)	(MB,0.3)	(M,0)	(MB,0.3)
	c_{10}	(B,-0.3)	(B,-0.3)	(M,0)	(B,-0.3)	(B,-0.3)	(M,0)
e_3	c_1	(M,0)	(M,0)	(M,0)	(M,0)	(M,0)	(MB,0.3)
	c_2	(M,0)	(B,0)	(A,0)	(M,0)	(A,0)	(M,0)
	c_3	(MA,0)	(MA,0)	(MA,0)	(MA,0)	(A,0.3)	(MA,0)
	c_4	(MA,0)	(A,-0.3)	(MA,0)	(B,-0.3)	(A,0.3)	(A,0.3)
	c_5	(MA,0)	(A,0.3)	(MA,0)	(MB,0)	(B,-0.3)	(A,0.3)
	c_6	(M,0)	(B,-0.3)	(M,0)	(B,-0.3)	(B,-0.3)	(M,0)
	c_7	(B,-0.3)	(B,-0.3)	(B,-0.3)	(B,-0.3)	(M,0)	(M,0)
	c_8	(A,0.3)	(A,0.3)	(M,0)	(B,-0.3)	(B,0)	(B,-0.3)
	c_9	(M,0)	(A,0)	(B,0)	(B,0)	(M,0)	(MB,0.3)
	c_{10}	(M,0)	(B,-0.3)	(M,0)	(B,-0.3)	(M,0)	(M,0)

4.2.3.6. Agregación Multietapa

Una vez expresada la información en un único dominio de expresión lingüístico S^5 , se aplica el proceso de Agregación Multietapa que consta de cuatro etapas para obtener los diferentes valores de importancia.

Calcular el valor colectivo de cada criterio para cada impacto. En esta etapa se calcula un valor colectivo, (s_q, α_q) , para cada criterio, c_h , de cada impacto I_{ij} usando un operador de agregación para 2-tuplas, tal y como se ha indicado en el MH-EIIA. En este ejemplo hemos utilizado la Media Aritmética para 2-tupla, Φ (ver Apéndice A), aunque pudieran emplearse otros dependiendo de las necesidades del problema de EIIA. De esta forma se obtienen los valores de la Tabla 4.10.

Tabla 4.10: Valor colectivo de los criterios

C	I_{21}	I_{22}	I_{24}	I_{25}	I_{26}	I_{28}
c_1	(B,-0.16)	(MB,-0.40)	(B,-0.16)	(MB,-0.40)	(B,-0.28)	(MB,0.12)
c_2	(B,-0.44)	(MB,0.30)	(B,-0.36)	(MB,0.40)	(B,-0.44)	(MB,0.20)
c_3	(MB,0.32)	(MB,0.32)	(MB,0.32)	(MB,0.32)	(MB,0.27)	(MB,0.32)
c_4	(MB,0.15)	(MB,0.13)	(MB,0.14)	(MB,0.02)	(MB,0.10)	(MB,0.07)
c_5	(MB,0.14)	(MB,0.14)	(MB,0.15)	(MB,0)	(MB,0.09)	(MB,0.07)
c_6	(MB,0.08)	(MB,0.02)	(MB,0.08)	(MB,0.02)	(MB,0.02)	(MB,0.06)
c_7	(MB,0.01)	(MB,0.05)	(MB,0.01)	(MB,0.05)	(MB,0.05)	(MB,0.12)
c_8	(MB,0.19)	(MB,0.16)	(MB,0.16)	(MB,0.05)	(MB,0.08)	(MB,0.08)
c_9	(MB,0.18)	(MB,0.21)	(MB,0.21)	(MB,0.08)	(MB,0.16)	(MB,0.08)
c_{10}	(MB,0.12)	(MB,0.05)	(MB,0.08)	(MB,0.05)	(MB,0.07)	(MB,0.12)

Calcular la importancia de cada impacto. Después de tener el valor colectivo para cada criterio de evaluación, se calcula la importancia para cada impacto (s_r, α_r) , utilizando en este caso un operador Media Ponderada Extendida para 2-tupla, Ψ , con el vector de pesos W^f , obteniéndose los resultados que se muestran en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11: Importancia de cada impacto

I_{21}	I_{22}	I_{24}	I_{25}	I_{26}	I_{28}
(M,0.38)	(M,-0.08)	(M,0.49)	(M,-0.48)	(M,0.05)	(B,0.03)

Ajustar la importancia de cada impacto. Debido a que los resultados expresados en 2-tuplas lingüísticas en S^5 no representan la naturaleza del impacto valorado, ajustamos estos valores siguiendo el procedimiento propuesto. A partir de S^5 generamos un nuevo conjunto S^9 con la sintaxis y semántica mostradas en la Figura 4.9. Esta semántica ha sido definida de acuerdo con la escala propuesta en [153].

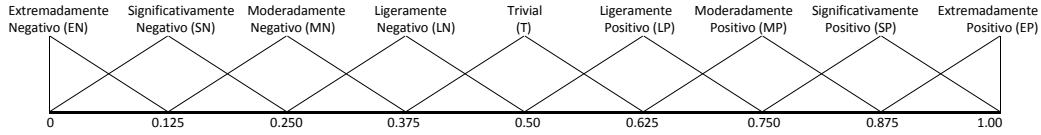


Figura 4.9: CTL de 9 términos

La transformación de S^5 a S^9 se realiza a través de la Ecuación (4.8), mediante la cual se obtienen los valores ilustrados en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12: Importancia ajustada de cada impacto

I_{21}	I_{22}	I_{24}	I_{25}	I_{26}	I_{28}
(MN,-0.38)	(MN,0.08)	(MN,-0.49)	(MN,0.48)	(MN,-0.05)	(LN,-0.03)

Calcular los valores finales de importancia. En este paso se calculan los valores finales de importancia para las acciones y factores así como la importancia global del proyecto, a partir de los valores generados en el paso anterior. Para ilustrar estos resultados, hemos ampliado la matriz inicial de impactos, para comprender mejor la relación entre los elementos del problema (ver Figura 4.10).

	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	
f_1	(MN,0.28)		(MN,-0.08)		(MN,0.17)	(MN,0.14)				(LN,0.05)	(MN,0.29)
f_2	(MN,-0.38)	(MN,0.08)		(MN,-0.49)	(MN,0.48)	(MN,-0.05)		(LN,-0.03)		(MN,-0.08)	(MN,0.08)
f_3	(LN,0.04)	(LN,0.24)	(LN,0.19)	(LN,0.05)	(LN,0.12)	(LN,0.15)	(LN,0.19)	(LN,0.24)		(LN,-0.31)	(LN,0.10)
f_4	(LN,0.21)		(LN,0.13)	(LN,0.16)	(LN,0.12)	(LN,-0.30)	(LN,0.20)	(LN,0.15)	(LN,0.16)	(LN,-0.25)	(LN,0.06)
f_5	(MN,0.34)	(MP,-0.31)	(LN,0.01)	(MN,-0.07)	(MN,0.37)	(LN,-0.30)		(LN,-0.10)	(LN,0.24)	(LN,-0.35)	(LN,0)
f_6	(MN,0.19)	(MP,-0.12)	(MN,0.18)	(MN,0.35)	(MN,0.32)	(MN,0.31)	(MN,0.42)	(LN,0.44)	(LN,0.26)	(LN,0.22)	(LN,-0.04)
f_7	(MN,-0.01)	(MN,0)		(MN,0.03)	(MN,0.39)	(MN,0.05)	(LN,-0.44)	(LN,-0.11)		(MN,0.39)	(MN,0.28)
f_8		(LP,0.02)	(MN,0.32)		(MN,0.38)	(MN,0.23)	(MN,0.44)		(LN,-0.44)	(MP,-0.43)	(LN,0.21)
Importancia de la acción	(MN,0.37)	(T,-0.01)	(LN,-0.37)	(MN,0.36)	(LN,-0.44)	(MN,0.40)	(LN,-0.24)	(LN,0.10)	(LN,0.05)	(LN,0.03)	
Importancia ponderada de la acción	(MN,0.23)	(T,-0.29)	(LN,-0.45)	(MN,0.22)	(MN,0.47)	(MN,0.31)	(LN,-0.34)	(LN,0.05)	(LN,0.04)	(LN,-0.03)	
Importancia Global	(LN,-0.25)										

Figura 4.10: Resultados finales

4.2.3.7. Resultados

Para concluir, ordenamos las alternativas según el valor descendente de su importancia utilizando las reglas de comparación de 2-tuplas [82]. Así, se obtienen los rankings para los impactos (que no mostramos por su elevado número), los factores (ver Tabla 4.13) y las acciones (ver Tablas 4.14 y 4.15). Los factores más impactados de forma negativa son el suelo y el subsuelo, la economía del territorio y el aire. Las acciones más impactantes son: la emisión de residuos sólidos, el desbroce y movimiento de tierra y el transporte de materiales y maquinarias. En esta fase la pavimentación de superficies impacta de forma positiva al territorio y a la población.

Tabla 4.13: Ranking de factores

Ranking	$f_8 \succ f_3 \succ f_4 \succ f_5 \succ f_6 \succ f_7 \succ f_1 \succ f_2$
Comparación de 2-tuplas	$(LN, 0.21) \succ (LN, 0.10) \succ (LN, 0.06) \succ (LN, 0) \succ (LN, -0.04) \succ (MN, 0.29) \succ (MN, 0.28) \succ (MN, 0.08)$

Tabla 4.14: Ranking de acciones

Ranking	$a_2 \succ a_8 \succ a_9 \succ a_{10} \succ a_7 \succ a_3 \succ a_5 \succ a_6 \succ a_1 \succ a_4$
Comparación de 2-tuplas	$(T, -0.01) \succ (LN, 0.10) \succ (LN, 0.05) \succ (LN, 0.03) \succ (LN, -0.24) \succ (LN, -0.37) \succ (LN, -0.44) \succ (MN, 0.40) \succ (MN, 0.37) \succ (MN, 0.36)$

Tabla 4.15: Ranking de acciones ponderado

Ranking	$a_2 \succ a_8 \succ a_9 \succ a_{10} \succ a_7 \succ a_3 \succ a_5 \succ a_6 \succ a_1 \succ a_4$
Comparación de 2-tuplas	$(T, -0.29) \succ (LN, 0.05) \succ (LN, 0.04) \succ (LN, -0.03) \succ (LN, -0.34) \succ (LN, -0.45) \succ (MN, 0.47) \succ (MN, 0.31) \succ (MN, 0.23) \succ (MN, 0.22)$

4.2.4. Análisis de Resultados

En la Figura 4.11 se muestran los resultados numéricos utilizando el tradicional Método de Conesa. A partir de ellos se realiza una clasificación siguiendo las siguientes reglas y leyendas:

- Irrelevante ($I < 25$): color amarillo.
- Moderado ($25 < I < 50$): color naranja.

	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	
f_1	-26	0	-32	0	-30	-31	0	0	0	-20	-139
f_2	-37	-37	0	-39	-25	-32	0	-16	0	-34	-220
f_3	-19	-17	-17	-20	-17	-17	-17	-17	0	-22	-163
f_4	-17	0	-22	-19	-22	-22	-17	-23	-23	-20	-185
f_5	-31	30	-19	-33	-25	-21	0	-19	-18	-21	-157
f_6	-29	33	-30	-27	-29	-26	-25	-19	-19	-23	-194
f_7	-33	-30	0	-27	-27	-27	-21	-24	0	-27	-216
f_8	0	22	-29	0	-26	-32	-31	0	-24	31	-89
Importancia de la acción	-192	1	-149	-165	-201	-208	-111	-118	-84	-136	
Importancia ponderada de la acción	-19.9	-0.9	-13.9	-16.9	-20.5	-21.2	-11.3	-12	-8.1	-17.9	
Importancia Global	-1363										

Figura 4.11: Resultados empleando el Método de Conesa

- Severo ($50 < I < 75$): color naranja oscuro.
- Crítico ($I > 75$): color rojo.

Para llegar a un resultado comprensible por los expertos e involucrados en la EIIA, es necesario realizar el proceso de clasificación a través de las reglas y leyendas mencionadas que, además, en el modelo original no están especificadas para valores positivos y negativos. Por otra parte, para la clasificación de los valores finales de importancia no hay reglas definidas por lo que la interpretación de los números se hace mucho más difícil. En cambio, con la aplicación del MH-EIIA se obtienen directamente valores lingüísticos, fáciles de interpretar y que implícitamente contienen la naturaleza del impacto.

a)

I		I		I	I				M
I	I		I	I	I		M		I
M	M	M	M	M	M	M	M		M
M		M	M	M	M	M	M	M	M
I	I	M	I	I	M		M	M	M
I	I	I	I	I	I	I	M	M	M
I	I		I	I	I	M	M		I
	M	I		I	I	I		M	I

b)

(MN,0.28)		(MN,-0.08)		(MN,0.17)	(MN,0.14)				(LN,0.05)
(MN,-0.38)	(MN,0.08)		(MN,-0.49)	(MN,0.48)	(MN,-0.05)		(LN,-0.03)		(MN,-0.08)
(LN,0.04)	(LN,0.24)	(LN,0.19)	(LN,0.05)	(LN,0.12)	(LN,0.15)	(LN,0.19)	(LN,0.24)		(LN,-0.31)
(LN,0.21)		(LN,0.13)	(LN,0.16)	(LN,0.12)	(LN,-0.30)	(LN,0.20)	(LN,0.15)	(LN,0.16)	(LN,-0.25)
(MN,0.34)	(MP,-0.31)	(LN,0.01)	(MN,-0.07)	(MN,0.37)	(LN,-0.30)		(LN,-0.10)	(LN,0.24)	(LN,-0.35)
(MN,0.19)	(MP,-0.12)	(MN,0.18)	(MN,0.35)	(MN,0.32)	(MN,0.31)	(MN,0.42)	(LN,0.44)	(LN,0.26)	(LN,0.22)
(MN,-0.01)	(MN,0)		(MN,0.03)	(MN,0.39)	(MN,0.05)	(LN,-0.44)	(LN,-0.11)		(MN,0.39)
	(LP,0.02)	(MN,0.32)		(MN,0.38)	(MN,0.23)	(MN,0.44)		(LN,-0.44)	(MP,-0.43)

Figura 4.12: a) Matriz de clasificación por el Método de Conesa y b) Matriz de clasificación por el MH-EIIA

Utilizando los mismos colores, para contrastar los resultados hemos propuesto la siguiente leyenda para la aplicación de nuestro modelo (ver Figura 4.12 b)):

- Ligeramente Negativo: color amarillo.
- Moderadamente Negativo: color naranja.
- Significativamente Negativo: color naranja oscuro.
- Extremadamente Negativo: color rojo.

Si analizamos la Figura 4.12 podemos observar que de manera general coinciden las clasificaciones planteadas. Además, los rankings de las alternativas (impactos, factores y acciones) coinciden, lo que demuestra que a través del nuevo modelo se han obtenidos resultados equivalentes a los originales.

Estos elementos indican que MH-EIIA es un modelo robusto, capaz de flexibilizar el marco de evaluación al integrar diferentes dominios de expresión y posibilitando procesos de Computación con Palabras que permiten obtener resultados de mayor interpretabilidad. De esta forma cumplimos uno de los objetivos de esta investigación.

4.3. Extensión del MH-EIIA para el Modelado de Información en Contextos Dudosos

Como hemos señalado, la complejidad de los problemas de EIIA se debe a la incertidumbre relacionada con el conocimiento de los expertos sobre el comportamiento de los impactos ambientales. Así, por ejemplo, para un impacto como la emisión de gases, un experto puede dudar sobre su intensidad, es decir, puede vacilar entre varios términos lingüísticos como *Alto* y *Muy Alto* o pudiera desear emitir una respuesta más elaborada y cercana al lenguaje común, como *Mayor que Medio*. O para este mismo impacto, respecto a su persistencia en el entorno, un experto podría dudar entre valores como “0.2”, “0.3” y “0.4”. Sin embargo, hemos identificado que a pesar de las novedades y ventajas de nuestro MH-EIIA, este presenta los siguientes inconvenientes:

- No permite modelar situaciones bajo incertidumbre, donde los expertos dudan ante varios valores en la valoración de los impactos ambientales, tanto para criterios cualitativos como cuantitativos.
- En el caso de la información lingüística, se utilizan términos lingüísticos simples y predefinidos que restringen la elicitación de preferencias de los expertos, por lo que algunas veces no pueden reflejar realmente sus opiniones y dudas.

Con respecto a la primera limitación, hemos encontrado dos soluciones importantes. Para manejar situaciones de incertidumbre provocada por la duda, donde los expertos involucrados en un problema de toma de decisión dudan entre varios valores para emitir una opinión o evaluar un criterio, deseando no seleccionar un valor único debido a que este no refleja su preferencia de forma precisa; Torra introdujo el concepto de Conjuntos Difusos Dudosos (CDD) [190] como una extensión de los conjuntos difusos. De manera similar al tratamiento de situaciones dudosas mediante CDD, pero en entornos cualitativos, puede ocurrir que los expertos duden entre varios términos lingüísticos al momento de emitir una valoración. Para modelar estas situaciones Rodríguez et al. en [162] propusieron el concepto de Conjuntos de Términos Lingüísticos Difusos Dudosos (CTLDD) que está basado en el Enfoque Lingüístico Difuso [231, 232, 233] y extiende el concepto de CDD al

contexto lingüístico. Ambos temas (CDD y CTLDD) son revisados en el Apéndice A de esta memoria de investigación.

Con respecto a la segunda limitación, Rodríguez et al. en [162] también definieron una gramática libre de contexto básica G_H , que permite generar expresiones lingüísticas comparativas similares a las utilizadas por los seres humanos en problemas de toma de decisiones lingüísticos, con el objetivo de mejorar la flexibilidad en la elicitación de la información lingüística de los expertos.

Por tanto, nuestro objetivo en este apartado es extender el MH-EIIA para, por una parte, permitir el modelado de situaciones de duda de los expertos sobre criterios cualitativos y cuantitativos, mediante la utilización de información dudosa heterogénea (CDD y CTLDD); y por otra parte, mejorar el modelado de la información lingüística mediante la utilización de herramientas que permitan generar expresiones cercanas al modelo cognitivo de los seres humanos y propias de la EIIA para que los expertos puedan expresar mejor su conocimiento; manteniendo la premisa de la obtención de resultados comprensibles, por lo que conservaremos el esquema de unificación en 2-tuplas lingüísticas. Para cumplir este propósito, será necesario:

1. Integrar la información difusa dudosa en los dominios de información de nuestro Marco Heterogéneo de EIIA.
2. Proponer métodos de tratamiento y normalización de la información dudosa.
3. Proponer métodos de unificación de la información difusa dudosa en 2-tuplas lingüísticas.

A continuación explicaremos cómo hemos modificado el MH-EIIA para el modelado de información en contextos dudosos.

4.3.1. Definición del Marco Heterogéneo de Evaluación

Naturalmente, lo primero que debemos hacer es integrar la información difusa dudosa en nuestro Marco Heterogéneo de Evaluación. Así, el conjunto de dominios $O = \{H, H_S\}$ podrá contener:

- Conjuntos Difusos Dudosos (H): $x_{ij}^{hk} = h_{ij}^{hk}$. Son comunes para evaluar criterios cuantitativos en ambientes bajo incertidumbre, donde los expertos dudan en la selección de un valor para expresar sus preferencias [162].

- Expresiones Lingüísticas Comparativas (H_S): $x_{ij}^{hk} = l_{ij}^{hk}$ expresiones lingüísticas generadas por una gramática G_H (ver Definición 28 del Apéndice A), comunes para evaluar criterios cualitativos en ambientes bajo incertidumbre donde los expertos dudan entre varios valores para valorar una variable lingüística [162].

4.3.2. Recopilación de Preferencias

Una vez ampliado el Marco de Heterogéneo de EIIA, las valoraciones de los expertos son recolectadas. Cada experto provee sus preferencias a través de vectores de utilidad $X_{ij}^k = (x_{ij}^{1k}, \dots, x_{ij}^{pk})$ que pueden registrarse como muestra la Tabla 4.1. Estas preferencias podrán ser emitidas mediante CDD, para los casos en que se evalúan criterios medioambientales cuantitativos, o a través de expresiones lingüísticas comparativas generadas de acuerdo a la gramática G_H para un CTL S , en los casos donde se evalúan criterios cualitativos.

Ejemplo 3 *Por ejemplo, para el caso de un impacto como la emisión de gases, el experto pudiera valorar la persistencia a través de distintos CDD como los siguientes:*

$$h_1 = \{0.1, 0.2, 0.3\}$$

$$h_2 = \{0.5, 0.6, 0.7\}$$

Ejemplo 4 *Para el mismo impacto, siendo S , el CTL de siete términos de la Figura 4.4 y empleando la gramática G_H de la Definición 28 del Apéndice A, el experto pudiera valorar la intesidad utilizando expresiones como las siguientes:*

$$ll_1 = \text{Bajo}$$

$$ll_2 = \text{menor que Alto}$$

$$ll_3 = \text{mayor que Alto}$$

$$ll_4 = \text{al menos Alto}$$

$$ll_5 = \text{como mucho Medio}$$

$$ll_6 = \text{entre Bajo y Muy Alto}$$

El uso de estas las expresiones lingüísticas generadas por G_H mejora la expresividad de los expertos para aportar sus preferencias sobre los criterios para cada impacto ambiental cuando dudan entre varios términos lingüísticos de S .

4.3.3. Evaluación de Alternativas

El propósito de la fase de Evaluación de Alternativas continúa siendo el mismo, obtener los valores de importancia para las alternativas del problema de EIIA, pero en el nuevo escenario, será necesario para ello lidiar con las preferencias expresadas a través de CDD y expresiones lingüísticas comparativas. Para ello, proponemos los siguientes pasos:

- A) Tratamiento de la Información Difusa Duda.
- B) Normalización.
- C) Unificación.
- D) Agregación Multietapa.
- E) Resultados.

Inicialmente, hemos introducido un nuevo paso que nos permite obtener los intervalos para cada CDD y los CTLDD para cada una de las expresiones lingüísticas comparativas, para posteriormente operar con estas estructuras. En segundo lugar, la información difusa dudosa se normaliza con el fin de eliminar los conflictos de costo/beneficio. Luego, la información difusa dudosa se unifica en 2-tuplas lingüísticas. Una vez expresada la información en 2-tuplas lingüísticas, el resto de los pasos se realiza de acuerdo al MH-EIIA. A continuación describiremos los pasos A), B) y C) por ser los que introducen modificaciones respecto al MH-EIIA original.

4.3.3.1. Tratamiento de la Información Difusa Duda

Para poder realizar los procesos de Computación con Palabras necesarios en la resolución del problema de EIIA, primero transformaremos los CDD en intervalos en $[0, 1]$ y las expresiones lingüísticas comparativas en CTLDD. Esto facilitará la normalización y unificación de la información difusa dudosa, como se muestra en la Figura 4.13).

- Transformación de CDD en intervalos.

Las valoraciones proporcionadas por los expertos mediante CDD, son transformadas en intervalos numéricos. Un intervalo en $[0, 1]$ es generado a partir

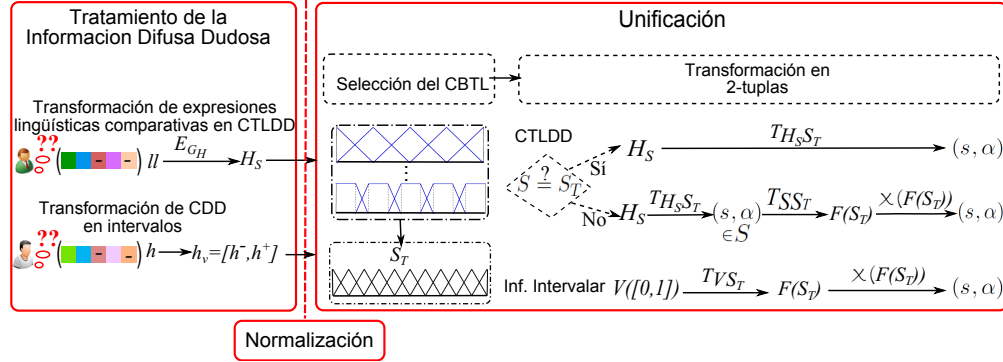


Figura 4.13: Transformaciones de expresiones lingüísticas y CDD

de los límites inferior y superior del CDD, lo que permitirá posteriormente operar con estos intervalos.

Definición 6 Sea h_1 un CDD, el intervalo de h_1 es:

$$h_{V_1} = [h_1^-, h_1^+]$$

donde $h_1^- = \min\{\gamma | \gamma \in h\}$ y $h_1^+ = \max\{\gamma | \gamma \in h\}$.

Ejemplo 5 Para los CDD recopilados en el Ejemplo 3, se obtienen los siguientes intervalos:

$$h_{V_1} = [0.1, 0.3]$$

$$h_{V_2} = [0.5, 0.7]$$

- Transformación de expresiones lingüísticas comparativas en CTLDD.

Las valoraciones proporcionadas por los expertos a través de expresiones lingüísticas comparativas son unificadas en CTLDD mediante la función de transformación E_{GH} (ver la Definición 29 en el Apéndice A).

Ejemplo 6 Para las expresiones presentadas en el Ejemplo 4, mediante la función E_{GH} obtendremos los CTLDD correspondientes:

$$E_{GH}(\text{Bajo}) = \{\text{Bajo}\}$$

$$E_{GH}(\text{menor que Alto}) = \{\text{Nulo}, \text{Muy Bajo}, \text{Bajo}, \text{Medio}\}$$

$$E_{G_H}(\text{mayor que Alto}) = \{\text{Muy Alto}, \text{Perfecto}\}$$

$$E_{G_H}(\text{al menos Alto}) = \{\text{Alto}, \text{MuyAlto}, \text{Perfecto}\}$$

$$E_{G_H}(\text{como mucho Medio}) = \{\text{Nulo}, \text{Muy Bajo}, \text{Bajo}, \text{Medio}\}$$

$$E_{G_H}(\text{entre Bajo y Muy Alto}) = \{\text{Bajo}, \text{Medio}, \text{Alto}, \text{MuyAlto}\}$$

4.3.3.2. Normalización

De acuerdo con el MH-EIIA original, en este paso la información difusa dudosa heterogénea se normaliza con el fin de eliminar conflictos de costo/beneficio. Para ello, a partir de las preferencias recopiladas, x_{ij}^{hk} , obtendremos las preferencias normalizadas $\bar{x}_{ij}^{hk}$ utilizando las ecuaciones definidas a continuación:

- Para intervalos de CDD: $x_{ij}^{hk} \in V([0, 1])$ evidentemente emplearemos el mismo método que para los valores intervalares en la Ecuación (4.2):

$$\bar{x}_{ij}^{hk} = \begin{cases} [h_{ij}^{-hk}, h_{ij}^{+hk}] & \text{si } c_h \in C^1 \\ [1 - h_{ij}^{+hk}, 1 - h_{ij}^{-hk}] & \text{si } c_h \in C^2 \end{cases} \quad (4.13)$$

- Para CTLDD: $x_{ij}^{hk} \in H_S$:

$$\bar{x}_{ij}^{hk} = \begin{cases} l_{ij}^{hp} & \text{si } c_h \in C^1 \\ \text{Neg}_{H_S}(l_{ij}^{hp}) & \text{si } c_h \in C^2 \end{cases} \quad (4.14)$$

donde Neg_{H_S} es un operador de negación sobre CTLDD tal que:

$$\text{Neg}_{H_S}(\{s_i, s_{i+1}, \dots, s_j\}) = \{s_k / \forall k \in H_S, k = \{g - j, g - (j - 1), \dots, g - i\}\} \quad (4.15)$$

Ejemplo 7 Así, por ejemplo, para un criterio de coste, supongamos que tenemos los CTLDD del Ejemplo 6, la normalización de los CTLDD es la siguiente:

$$\text{Neg}_{H_S}(\{\text{Bajo}\}) = \{\text{Alto}\}$$

$$\text{Neg}_{H_S}(\{\text{Nulo}, \text{Muy Bajo}, \text{Bajo}, \text{Medio}\}) =$$

$$\{\text{Medio}, \text{Alto}, \text{Muy Alto}, \text{Perfecto}\}$$

$$\text{Neg}_{H_S}(\{\text{Muy Alto}, \text{Perfecto}\}) = \{\text{Nulo}, \text{Muy Bajo}\}$$

$$\text{Neg}_{H_S}(\{\text{Alto}, \text{MuyAlto}, \text{Perfecto}\}) = \{\text{Nulo}, \text{Muy Bajo}, \text{Bajo}\}$$

$$\begin{aligned}
 Neg_{H_S}(\{Nulo, Muy Bajo, Bajo, Medio\}) &= \{Medio, Alto, Muy Alto, Perfecto\} \\
 Neg_{H_S}(\{Bajo, Medio, Alto, Muy Alto\}) &= \{Muy Bajo, Bajo, Medio, Alto\}
 \end{aligned}$$

4.3.3.3. Unificación

Como hemos explicado, para obtener los valores de importancia expresados mediante 2-tuplas lingüísticas, es necesario convertir los CDD y CTLDD en 2-tuplas. Para ello, se utilizarán las siguientes transformaciones que, como puede apreciarse en la Figura 4.13, mantienen la idea básica de unificación descrita en el apartado 4.1.4.2:

- *Unificación de CDD en 2-tupla*

Una vez que hemos obtenido el intervalo del CDD, la unificación se realiza según lo planteado para los valores intervalares:

1. *Transformación en Conjuntos Difusos*: Una vez que el intervalo ha sido determinado, se aplica la función de transformación $T_{V_{S_T}} : V \rightarrow F(S_T)$ que transforma un intervalo h_V en un conjunto difuso en S_T (remitirse a la Definición 2).
2. *Transformación en 2-tupla*: El conjunto difuso F_{S_T} , es convertido en un valor 2-tupla mediante la función de transformación $\chi : F(S_T) \rightarrow \tilde{S}$ que fue revisada en la Definición 4.

- *Unificación de CTLDD en 2-tupla*

Debido a que un CTLDD está compuesto por varios términos lingüísticos, para llevar a cabo la fusión lingüística, estos términos lingüísticos son agregados y el resultado es representado por un valor en 2-tupla. Cuando los expertos dudan acerca de diferentes términos lingüísticos, esto implica distintos grados de importancia de cada término, por consiguiente el operador de agregación seleccionado debe reflejar este comportamiento.

Además, para unificar un CTLDD en 2-tupla, debemos tener en cuenta los resultados del primer paso del procedimiento descrito en el apartado, es decir, debemos considerar el CBTL seleccionado. En este sentido, tendremos

dos variantes posibles: (1) el CTL empleado por la gramática libre de contexto G_H ha sido seleccionado como el CBTL o (2) el CTL empleado por la gramática libre de contexto G_H no ha sido seleccionado como el CBTL, sino que este es un CTL de mayor granularidad. Por consiguiente, la unificación de CTLDD en 2-tupla, debe soportar ambas opciones:

1. Si $S = S_T$:

Definición 7 Sea $H_{S_1} = \{s_i, \dots, s_j\}$ un CTLDD, la función de transformación $T_{H_S S_T} : H_S \rightarrow \tilde{S}$ se define como sigue:

$$T_{H_S S_T}(H_{S_1}) = \Delta \left(\sum_{k=i}^j w_k * k \right)$$

donde $s_k \in S$, $w_k \in [0, 1]$, $k = \{i, \dots, j\}$ y $\sum_{k=i}^j w_k = 1$.

2. Si $S \neq S_T$: después de obtener un valor 2-tupla en S mediante el paso anterior, este valor será transformado en 2-tupla en S_T aplicando las funciones de transformación definidas para S . Es decir, primero el valor 2-tupla en S será transformado en un conjunto difuso en S_T (ver Definición 3) y luego este será transformado en un valor 2-tupla pero en S_T (ver Definición 4).

En resumen, los valores lingüísticos en 2-tuplas $(s_p, \alpha_p)_{ij}^{hk}$ son generados como sigue:

$$\tilde{x}_{ij}^{hk} = (s_a, \alpha_a)_{ij}^{hk} = \begin{cases} T_{H_S S_T}(\bar{x}_{ij}^{hk}) & \text{si } \bar{x}_{ij}^{hk} \in H_S \text{ y } S = S_T \\ \chi(T_{SS_T}(T_{H_S S_T}(\bar{x}_{ij}^{hk}))) & \text{si } \bar{x}_{ij}^{hk} \in H_S \text{ y } S \neq S_T \\ \chi(T_{VS_T}(\bar{x}_{ij}^{hk})) & \text{si } \bar{x}_{ij}^{hk} \in V \end{cases} \quad (4.16)$$

Ejemplo 8 Supongamos el CTLDD $\{\text{Muy Alto}, \text{Perfecto}\}$ (ver Figura 4.14), generado desde la expresión “al menos Muy Alto”, su transformación en 2-tupla se muestra a continuación:

$$T_{H_S S_T}(\{\text{Muy Alto}, \text{Perfecto}\}) =$$

$$\Delta \left(\frac{5}{6} \Delta^{-1}(\text{Perfecto}, 0) + \frac{1}{6} \Delta^{-1}(\text{Muy Alto}, 0) \right) = \Delta(5.83) = (\text{Perfecto}, -0.17)$$

El cálculo de los pesos para el operador de agregación, dependerá de la intención y el problema. En [122] Liu y Rodríguez presentaron un modelo para calcular estos pesos en caso de utilizar el operador de agregación OWA [210] (véase el Apéndice B). Esta propuesta es la que hemos aplicado para este ejemplo.

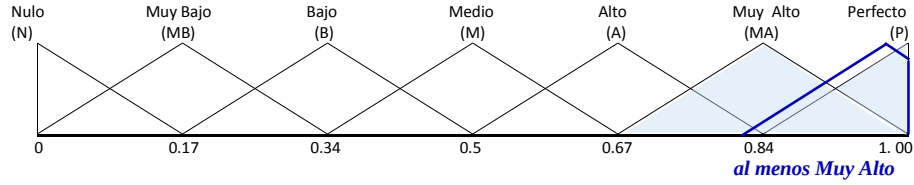


Figura 4.14: Transformación del CTLDD $\{\text{Muy Alto}, \text{Perfecto}\}$ en S^7

A partir de la unificación en 2-tuplas, puede aplicarse el resto de las etapas del MH-EIIA para la solución del problema de EIIA. Como hemos visto, la extensión del MH-EIIA para el modelado de la información dudosa, permite dotar a los expertos de mayor flexibilidad a la hora de expresar sus valoraciones y al mantener el modelo computacional basado en 2-tuplas lingüísticas para desarrollar los procesos de Computación con Palabras, se obtienen resultados lingüísticos precisos y fácilmente comprensibles por los expertos y decisores.

Capítulo 5

Modelo de Evaluación Dinámica de la Importancia del Impacto Ambiental

Existen problemas en la vida real donde es necesario tener en cuenta las valoraciones de las alternativas durante múltiples períodos para seleccionar la mejor opción, ya sea en cada período o al final de todos ellos. Por otra parte, a través del tiempo, las alternativas podrán desaparecer, otras nuevas podrán estar disponibles o puede modificarse su evaluación de acuerdo a los criterios considerados; incluso los criterios o expertos pueden cambiar. Estos problemas de TDD [35, 120, 168] son naturalmente más complejos que los problemas tradicionales de TDMC.

En el apartado 2.1.4.2 de esta memoria, describimos cómo el significado ambiental de una alteración varía en el tiempo porque, por una parte, *varía la propia alteración*, y por otra parte porque *la percepción social de la misma varía* también. Los impactos ambientales suelen cambiar en el tiempo [49], lo que determina su carácter dinámico. Sin embargo los métodos convencionales de EIIA no permiten modelar su naturaleza dinámica a pesar de que los impactos ambientales cambian en el tiempo.

En la literatura podemos encontrar diferentes propuestas para resolver un problema de TDD. En el Capítulo 3 hemos revisado, por una parte, el enfoque multi-período que provee soluciones [40, 51, 120, 174, 177, 182, 184, 199, 200, 208, 209, 227, 239], en las que se agregan todas las valoraciones recogidas en diferentes itera-

ciones y se emite una evaluación final única; y por otra parte, el enfoque general de TDD [35, 36, 147, 160] que a partir de la extensión del modelo clásico de TDMC, permite generar soluciones, bien en cada una de estas iteraciones, o bien al final de todas ellas, pero donde cada solución, final o intermedia, tiene en cuenta las soluciones anteriores sin necesidad de agregar toda la información recogida en cada período.

El carácter genérico, flexible y la posibilidad de disminuir los costos computacionales mediante la utilización de operadores de agregación asociativos, hacen del enfoque de Campanella y Ribeiro, una propuesta adecuada para la solución de problemas de EIHA en contextos dinámicos. Si bien la asociatividad del operador de agregación empleado para obtener las evaluaciones dinámicas evita que tengamos que guardar toda la información de todas las alternativas para todos los períodos, también hace que el modelo en ocasiones genere iguales evaluaciones dinámicas para diferentes alternativas independientemente del comportamiento que hayan tenido en los diferentes períodos evaluados.

La EIHA como método, puede no sólo emplearse con carácter predictivo como instrumento que anticipa los impactos de proyecto, sino que también puede utilizarse como herramienta de apoyo en estudios *expost* que permiten estimar el impacto de un proyecto en ejecución. En tales situaciones se necesita discriminar diferentes elementos según su evolución en el tiempo; estos casos pueden ser:

1. En un proyecto, evaluar en el tiempo la evolución de sus elementos. Por ejemplo, el comportamiento de determinados impactos, el impacto de distintas acciones o la respuesta de los diferentes factores ambientales ante las acciones del proyecto.
2. Para diferentes proyectos, comparar en el tiempo el comportamiento de su impacto ambiental. Por ejemplo, una empresa puede necesitar valorar el estado de sus proyectos o en el contexto del desarrollo local, es usual comparar los proyectos que se ejecutan en una comunidad.

En esta memoria de investigación estamos interesados en modelar situaciones del segundo tipo. En consecuencia, en este capítulo, presentaremos un nuevo modelo discriminativo de TDD a partir de la mejora del enfoque general de Campanella y Ribeiro [35]. Posteriormente presentaremos otro modelo que permite a

partir de esta propuesta, desarrollar la EIIA en contextos dinámicos y con información heterogénea. Por último expondremos cómo aplicarlo en situaciones con estas características.

5.1. Limitación del Modelo General de TDD

La propiedad de asociatividad del operador de agregación empleado en la parte dinámica del modelo de Campanella y Ribeiro [35] (ver apartado 5.2) evita el almacenamiento de la información de todas las alternativas en todos los períodos, debido a que la evaluación dinámica sólo depende de la evaluación no dinámica en el período actual y la evaluación dinámica en el período anterior. Esto puede ser visto como un tipo de propiedad Markoviana en la que el resultado de la agregación sólo depende del valor agregado en el período anterior y el nuevo argumento [223]. Sin embargo, esta ventaja trae como consecuencia que la función de evaluación dinámica pueda obtener evaluaciones dinámicas iguales para las diferentes alternativas que presentan diferentes perfiles o comportamiento a través del tiempo. Esto provoca que el modelo no pueda discriminar las alternativas de acuerdo con el perfil temporal porque la propiedad de asociatividad no permite distinguir el orden de dichos valores agregados (anteriores y nuevos).

Para ilustrar este inconveniente, presentaremos dos situaciones en las que se utiliza para mayor simplicidad, una política de retención que mantiene todas las alternativas en el conjunto histórico. Ambas situaciones utilizan, sin pérdida de generalidad, los operadores de agregación asociativos suma probabilística y producto para el cálculo de la evaluación dinámica, pero es importante destacar que este tipo de situación puede ocurrir con el uso de cualquier otro operador.

Situación a): La Tabla 5.1 muestra los resultados obtenidos por el modelo durante cinco períodos de decisión. Las evaluaciones dinámicas han sido calculadas utilizando la t-conorma suma probabilística definida en la Ecuación (B.2) del Apéndice B (que exhibe refuerzo hacia arriba) con el objetivo de acentuar la tendencia de altas evaluaciones no dinámicas. La Figura 5.1 muestra el comportamiento de estas evaluaciones.

Limitación: Para $t = 3$, la evaluación no dinámica de $a1$ aumenta, mientras que la de $a2$ disminuye, sin embargo, ambas alternativas tienen igual evaluación dinámica ($E_3(a1) = E_3(a2)$). En $t = 4$, la evaluación no dinámica de

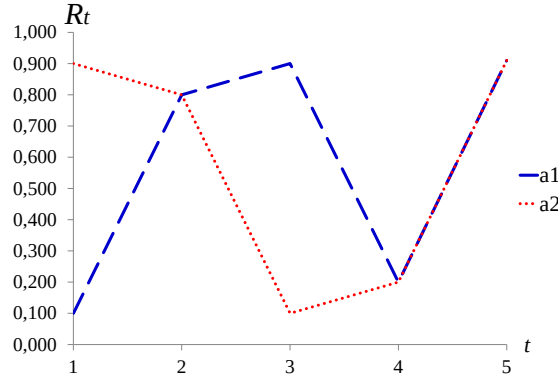


Figura 5.1: Evaluación no dinámica de las alternativas en la Situación a).

Tabla 5.1: Resultados obtenidos para la Situación a).

A_t	$R_1 = E_1$	R_2	E_2	R_3	E_3	R_4	E_4	R_5	E_5
$a1$	0.100	0.800	0.820	0.900	0.982	0.200	0.996	0.910	0.999
$a2$	0.900	0.800	0.980	0.100	0.982	0.200	0.996	0.910	0.999

$a1$ disminuye y la de $a2$ aumenta, pero aún así, ambas tienen nuevamente la misma evaluación dinámica ($E_4(a1) = E_4(a2)$). Finalmente, en $t = 5$ la evaluación de ambas alternativas exhibe el mismo incremento pero la evaluación dinámica sigue siendo igual ($E_5(a1) = E_5(a2)$).

Situación b) La Tabla 5.2 presenta los resultados para tres períodos de decisión. En esta ocasión las evaluaciones dinámicas se calculan mediante la t-norma producto (con refuerzo hacia abajo).

Limitación: Todas las alternativas tienen diferentes incrementos de las evaluaciones no dinámicas (como se muestra en la Figura 5.2), pero todas reciben igual evaluación dinámica en $t = 3$. Nuevamente el modelo no puede identificar cuál es la mejor alternativa a través de la evaluación dinámica.

Estas situaciones problemáticas pueden ser resumidas como sigue:

1. Las alternativas obtienen igual evaluación dinámica aunque presenten diferente evolución (ver $t = 4$ y $t = 5$ en la Figura 5.1).

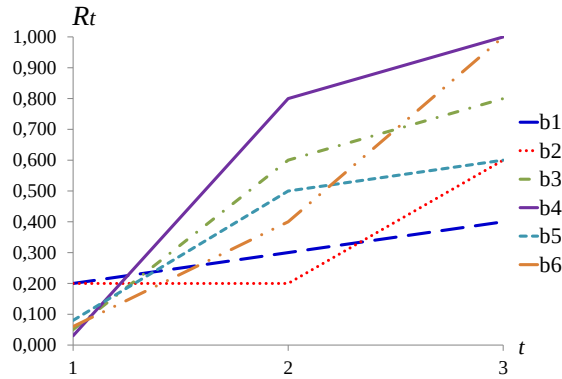


Figura 5.2: Evaluación no dinámica de las alternativas en la Situación b).

Tabla 5.2: Resultados obtenidos para la Situación b).

A_t	$R_1 = E_1$	R_2	E_2	R_3	E_3
$b1$	0.200	0.300	0.060	0.400	0.024
$b2$	0.200	0.200	0.040	0.600	0.024
$b3$	0.050	0.600	0.030	0.800	0.024
$b4$	0.030	0.800	0.024	1.000	0.024
$b5$	0.080	0.500	0.040	0.600	0.024
$b6$	0.060	0.400	0.024	1.000	0.024

2. Las alternativas obtienen igual evaluación dinámica a pesar de que presenten evoluciones opuestas (ver $t = 3$ en la Figura 5.1).
3. Las alternativas obtienen igual evaluación dinámica aunque presenten, bien una tendencia de incremento en las evaluaciones (como en $t = 3$ de la Figura 5.2), o una evolución de decrecimiento en las evaluaciones.

En tales situaciones, el decisor puede resolver el problema bajo diferentes perspectivas. Por ejemplo, en la Figura 5.2, para $t = 3$, el decisor puede seleccionar la alternativa con mayor evaluación no dinámica en ese período ($b4$ y $b6$) o la alternativa con mayor incremento del período anterior al actual ($b4$).

Sin embargo, ambas soluciones implican la *pérdida de la noción dinámica del*

problema y por tanto, de la esencia de la TDD. Para resolver este inconveniente, nuestro objetivo es extender y mejorar el modelo original mediante la integración de un índice que permita al decisor seleccionar la mejor alternativa de acuerdo con el comportamiento de las evaluaciones a través del tiempo y considerando diferentes actitudes.

5.2. Un Nuevo Modelo Discriminativo de Toma de Decisión Dinámica (MD-TDD)

Como hemos explicado, en la resolución de problemas dinámicos utilizando el modelo de Campanella y Ribeiro [35], los decisores pueden enfrentarse a situaciones complejas en las que la evaluación dinámica no es suficiente para elegir la mejor alternativa.

Para solucionar esta limitación a partir de la propuesta de Campanella y Ribeiro [35], hemos planteado un nuevo Modelo Discriminativo de Toma de Decisión Dinámica (MD-TDD) que consta de seis pasos fundamentales:

- A) Cálculo de la evaluación no dinámica.
- B) Cálculo de la evaluación dinámica.
- C) Cálculo de los índices discriminativos para alternativas con evaluaciones dinámicas iguales.
- D) Resultados.
- E) Actualización de la información histórica.

La Figura 5.3 muestra el esquema general del MD-TDD. El paso **A)** se corresponde con los modelos clásicos de TDMC. El paso **B)** se lleva a cabo de acuerdo al enfoque general de TDD de Campanella y Ribeiro [35] revisado en el apartado de esta memoria. El paso **C)** consiste en calcular un coeficiente que llamamos Índice Discriminativo Dinámico y se realiza sólo para las alternativas con iguales valores de la evaluación dinámica. En el paso **D)**, se ordenan las alternativas teniendo en cuenta los valores de la evaluación dinámica y del índice discriminativo cuando

sea necesario. El paso **E)**, permite actualizar la información histórica de las alternativas, de acuerdo con los resultados del paso **D)** y la política de retención predefinida.

Como puede apreciarse, la modificación fundamental con respecto al modelo general de TDD [35], radica en el cálculo del Índice Discriminativo Dinámico en el paso **C)** y su utilización para generar el orden de las alternativas en el paso **D)**, por lo que en el siguiente apartado describimos en profundidad cómo se obtiene y su función en el MD-TDD .

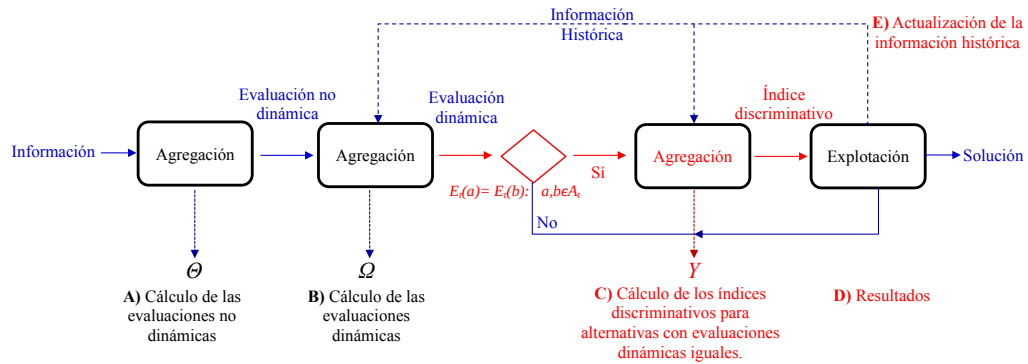


Figura 5.3: Esquema general del MD-TDD

5.2.1. Cálculo del Índice Discriminativo Dinámico

Cuando, a pesar de tener desempeños diferentes e incluso opuestos, varias alternativas reciben igual evaluación dinámica, dos perspectivas pueden considerarse para seleccionar la solución:

1. Perspectiva estática: el decisor solamente está interesado en el comportamiento o evaluación de las alternativas en el período actual y ante una coincidencia en las evaluaciones dinámicas, el orden entre ellas se determina de acuerdo con el valor de la evaluación no dinámica en el período actual.
2. Perspectiva dinámica: el decisor está interesado en el desempeño o evolución de las alternativas a través del tiempo, por lo que el orden final se genera a partir de un análisis de los incrementos y decrementos en su evaluación en todos los períodos.

Para respetar la esencia (dinámica) en la resolución del problema de TDD cuando se obtienen iguales evaluaciones dinámicas para diferentes alternativas, parece lógico y adecuado encontrar una solución siguiendo la segunda variante, que mantiene la premisa fundamental de un problema de este tipo, es decir, que *el perfil temporal de una alternativa se tenga en cuenta para la comparación con otras alternativas*.

En general, puede definirse un operador $\bigwedge$ en el espacio de secuencias [20]. Dada una serie de números reales $\mathbf{B} = \{\mathbf{b}_n\}$, podemos considerar la serie $\bigwedge \mathbf{B} = \{\mathbf{b}_{n+1} - \mathbf{b}_n\}$ a partir de las diferencias entre los términos sucesivos de $\mathbf{B}$.

Definición 8 *El cambio en la evaluación, $D_t(a_j)$, es la diferencia entre las evaluaciones de una alternativa a , en el período anterior, $t - 1$, y el actual, t , y se define como:*

$$D_t(a_j) = \begin{cases} 0, & a_j \in A_t \setminus H_{t-1} \\ R_t(a_j) - R_{t-1}(a_j), & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (5.1)$$

Debido a que $R_t(a_j), R_{t-1}(a_j) \in [0, 1]$, los incrementos o decrementos en la evaluación de una alternativa, $D_t(a_j)$, en cada período de decisión se obtienen en una escala bipolar $D_t(a_j) \in [-1, 1]$ [65], en la que 0 es llamado el elemento neutro que representa la inexistencia de un cambio en la evaluación desde un período $t - 1$ a uno siguiente t .

El cambio en la evaluación de una alternativa $D_t(a_j)$, sólo encierra el comportamiento de la evaluación entre dos períodos de tiempo consecutivos (de $t - 1$ a t), por lo que es necesario formalizar un mecanismo dinámico que considere todos los cambios en las evaluaciones durante todos los períodos incluidos en el problema de TDD.

Los beneficios del cálculo de los resultados finales sin almacenar todos los valores anteriores (a través de la asociatividad) y la modulación, además, del peso de estos valores en los resultados finales (a través de los refuerzos) se utilizan también en la propuesta de Índice Discriminativo Dinámico, $\xi_t(\cdot)$, debido a sus características:

- *Dinámico*: debe representar el cambio de calificación a través del tiempo sin almacenar todos ellos.
-

- *Personalizable*: debe ser capaz de modelar comportamientos diferentes respecto a decrementos o incrementos de evaluación alternativa en diferentes períodos.

Definición 9 Sea $D_t(a_j)$ el cambio en la evaluación de una alternativa a_j en un período t y $\Upsilon : [-1, 1]^2 \rightarrow [-1, 1]$ un operador de agregación bipolar. El Índice Discriminativo Dinámico, que representa el comportamiento de las evaluaciones de dicha alternativa a través del tiempo hasta t , es una función $\xi_t : A_t \cup H_{t-1} \rightarrow [-1, 1]$ dada por:

$$\xi_t(a_j) = \begin{cases} D_t(a_j), & a_j \in A_t \setminus H_{t-1} \\ \Upsilon(\xi_{t-1}(a_j), D_t(a_j)), & a_j \in A_t \cap H_{t-1} \\ \xi_{t-1}(a_j), & a_j \in H_{t-1} \setminus A_t \end{cases} \quad (5.2)$$

El estudio del cálculo ha demostrado que las derivadas son las cantidades matemáticas que representan el cambio continuo. Si reemplazamos derivadas (cambio continuo) por diferencias de cambio (discreta), entonces las técnicas desarrolladas para el análisis de sistemas discretos son muy similares a muchos de los métodos que se utilizan para el estudio de sistemas continuos y $\bigwedge$ (derivada de tiempo discreto) juega el papel de la derivada convencional (continua). El operador iterativo, o el grado de operador $\bigwedge$ se denota $\bigwedge^k$, es decir, $\bigwedge^k \mathbf{B} = \bigwedge \bigwedge^{k-1} \mathbf{B}$. De esta manera podemos ampliar nuestro índice mediante la introducción de índices de orden superior asociados a derivadas de tiempo discreto de órdenes superiores $\bigwedge^k$.

El comportamiento del índice $\xi_t(a_j)$ de una alternativa a se describe como sigue:

- Si $a_j \in A_t \setminus H_{t-1}$ entonces su Índice Discriminativo Dinámico $\xi_t(a_j)$ es igual a su cambio en la evaluación $D_t(a_j)$.
 - Si $a_j \in A_t \cap H_{t-1}$, entonces su Índice Discriminativo Dinámico se calcula mediante la agregación del valor del Índice Discriminativo Dinámico en el período anterior y el valor actual del cambio en la evaluación $\Upsilon(\xi_{t-1}(a_j), D_t(a_j))$.
 - Si $a_j \in H_{t-1} \setminus A_t$, entonces el valor del Índice Discriminativo Dinámico es igual al obtenido en el período anterior, $\xi_t(a_j) = \xi_{t-1}(a_j)$.
-

Tabla 5.3: Características de los operadores de agregación utilizados en el MD-TDD

Operador	Definición	Propiedades
Θ	$[0, 1]^n \rightarrow [0, 1]$	
Ω	$[0, 1]^2 \rightarrow [0, 1]$	Asociatividad, Refuerzo
Υ	$[-1, 1]^2 \rightarrow [-1, 1]$	Asociatividad, Bipolaridad, Refuerzo

Por lo tanto, si diferentes alternativas obtienen igual Evaluación Dinámica $E_t(\cdot)$ en un período t , entonces el ranking para estas alternativas en t , se generará teniendo en cuenta los valores del $\xi_t(\cdot)$, lo cual refleja la perspectiva dinámica del problema de toma de decisión.

La selección del operador de agregación dependerá de la actitud del decisor con respecto a los cambios en la evaluación pero es importante destacar que es independiente del resto de los operadores de agregación utilizados en el MD-TDD, es decir de Θ y Ω en los pasos **A)** y **B)** respectivamente.

La Tabla 5.3 resume las características principales de los operadores de agregación utilizados en cada uno de los tres procesos de agregación que se realizan en los pasos que componen el MD-TDD ilustrado en la Figura 5.3. La diferencia fundamental en la caracterización de los operadores Ω y Υ radica en que Υ debe manejar valores en la escala bipolar $[-1, 1]$, mientras que Ω opera solamente en el intervalo $[0, 1]$.

En consecuencia, es necesario extender este último a una escala bipolar [75] en $[-1, 1]$, en la que un elemento notable del intervalo, e , pueda jugar diferentes roles, ya sea como elemento neutro o absorbente. Este hecho precisamente nos lleva hacia la agregación bipolar, cuya característica principal es el tratamiento diferenciado, y por consiguiente la obtención de valores diferentes, para la agregación de valores mayores o menores que e [225].

Por una parte, encontramos que las uninormas [71, 222] satisfacen esta caracterización pero en $[0, 1]$. Por otra parte, para modelar la incertidumbre y la no linealidad, se han presentado pseudo-operaciones [150, 151, 152] que se utilizan en el pseudo-análisis (generalización del análisis clásico) donde en lugar de trabajar con el dominio de los números reales, se toma un semianillo en un intervalo real

$[a, b] \subset [-\infty, \infty]$ [1]. La pseudo-suma y la pseudo-multiplicación constituyen ejemplos de este tipo de operaciones. En [75] fue propuesto un reajuste para considerar valores en $[-1, 1]$, tal que, dada una t-conorma continua $S : [0, 1]^2 \rightarrow [0, 1]$, la pseudo-suma simétrica $\oplus$, es una operación binaria $[-1, 1]$ definida como sigue:

- R1** Para $x, y \geq 0$: $x \oplus y = S(x, y)$.
- R2** Para $x, y \leq 0$: $x \oplus y = -S(-x, -y)$.
- R3** Para $x \in [0, 1[, y \in]-1, 0]$: $x \oplus y = x \ominus_S (-y)$. Además, $1 \oplus (-1) = 1$ o -1 .
- R4** Para $x \leq 0, y \geq 0$: simplemente invertir x e y .

La estructura de la operación binaria $\oplus$ está estrechamente relacionada con las uninormas. Desde el punto de vista de las escalas bipolares, el intervalo $[-1, 1]$ es visto como la unión de dos escalas unipolares.

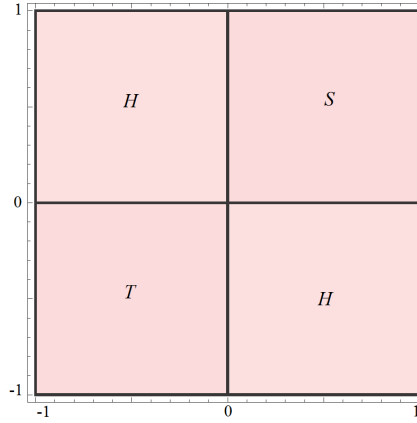


Figura 5.4: La estructura de $\oplus$ en $[-1, 1]$

Proposición 1 $T = \oplus_{/[-1,0]^2}$ es una t-norma sobre $[-1, 0]$ (i.e., en particular $T(x, 0) = x$, para cada $x \in [-1, 0]$), $S = \oplus_{/[0,1]^2}$ es una t-conorma en $[0, 1]$ y H es una función promedio $H = \oplus_{/[-1,0] \times [0,1] \cup [0,1] \times [-1,0]}$ (ver Figura 5.4). Estas tienen las siguientes propiedades:

- Si $x, y \in [0, 1]$, entonces $x \oplus y = S(x, y) \geq \max\{x, y\}$.
 - Si $x, y \in [-1, 0]$, entonces $x \oplus y = T(x, y) \leq \min\{x, y\}$.
 - Si $-1 \leq y \leq 0 \leq x \leq 1$, entonces $y \leq x \oplus y = H(x, y) \leq x$.
-

Las proposiciones anteriores proveen comportamientos que pueden ser interpretados como las actitudes para manejar los cambios en la evaluación de una alternativa, es decir la evolución de su desempeño:

- Optimista: cuando ambos valores (el índice anterior y el cambio actual) son positivos, la agregación tiene un comportamiento de refuerzo hacia arriba.
- Pesimista: cuando por el contrario ambos valores son negativos, la agregación tiene un comportamiento de refuerzo hacia abajo.
- Promedio: cuando uno de los valores es positivo y el otro negativo, actúa como un operador de agregación promedio.

La función de agregación $\oplus$ exhibe un comportamiento conjuntivo en $[-1, 0]$ y disyuntivo en $[0, 1]$. En el resto del dominio, el comportamiento es promedio.

Por otra parte, sea S una t-conorma estricta con generador aditivo $s : [0, 1] \rightarrow [0, \infty]$, con $s(0) = 0$ y de $g : [-1, 1] \rightarrow \mathbb{R}$, la extensión simétrica de s , tal que $g(0) = 0$, es decir,

$$g(x) = \begin{cases} s(x), & x \geq 0 \\ -s(-x), & x < 0, \end{cases} \quad (5.3)$$

es posible redimensionar $\oplus$ a un operador binario U en $[0, 1]$ tal que U es un operador uninorma generado. Por tanto, $x \oplus y = g^{-1}(g(x) + g(y))$ para cualquier $x, y \in [-1, 1]$. También introducimos otra función $u : [0, 1] \rightarrow [-\infty, \infty]$ definida como $u(x) = g(2x - 1)$ que es estrictamente creciente y satisface $u(\frac{1}{2}) = 0$. Entonces $U(z, t) = u^{-1}(u(z) + u(t))$ para cualquier $z, t \in [0, 1]$. U es una uninorma continua (excepto en $(0, 1)$ y $(1, 0)$), es estrictamente creciente en $]0, 1[^2$ y tiene como elemento neutro $\frac{1}{2}$. Además, la t-norma inducida T_U es el dual de S .

Este tipo de operador debe ser utilizado si la actitud de quien toma las decisiones está influenciada por el aumento o disminución de las evaluaciones de las alternativas. En particular, cuando todas las calificaciones de los atributos son positivos, mientras mayores sean, mayor será el resultado de la agregación. Ocurrirá lo contrario para valores negativos, y cuando se produce un conflicto los valores se agregarán de manera neutral al riesgo, es decir, el comportamiento será promedio.

5.3. Modelo de Evaluación de la Importancia del Impacto Ambiental con Información Heterogénea en Contextos Dinámicos

La naturaleza dinámica de los impactos ambientales, ha provocado la necesidad de modelar procesos de Análisis de Decisión en los que se obtengan resultados que tengan en cuenta los cambios en el tiempo de dichos impactos ambientales. Como hemos explicado en el inicio de este capítulo, existen situaciones en las que, para proyectos de larga duración, es necesario realizar varios controles o revisiones de sus impactos ambientales, con el propósito de conocer la evolución del impacto o la efectividad de las medidas correctoras empleadas. Igualmente, en ocasiones se requiere comparar la evolución de varios proyectos considerando el comportamiento en el tiempo de sus impactos ambientales. Ambos casos son ejemplos de contextos dinámicos de EIIA. En cada revisión o momento de decisión se determina el impacto ambiental del proyecto mediante métodos de EIIA; pero si se desea emitir una evaluación que tenga en consideración los resultados de evaluaciones anteriores, en lugar de evaluaciones estáticas aisladas, no se cuenta con un mecanismo formal de análisis de decisión para dar solución a esta problemática en el área de la EIIA.

Para introducir el nuevo modelo, es pertinente recordar que en la introducción de esta memoria hemos presentado como problemas fundamentales en la EIIA la necesidad del tratamiento preciso de información heterogénea y de ofrecer resultados que tengan en cuenta la naturaleza dinámica de los impactos ambientales en el problema de decisión. Una solución al primero de estos problemas es el MH-EIIA presentado en el Capítulo 4. Para solucionar el segundo de los problemas, primero fue necesario mejorar el enfoque general de TDD debido a que existen situaciones en las que no permite discriminar las alternativas de acuerdo a su comportamiento o evaluación a lo largo del tiempo. Por ello presentamos el MD-TDD, que incorpora el cálculo de un Índice Discriminativo Dinámico para resolver la limitación anterior.

Para cumplir integralmente el objetivo de esta investigación debemos entonces proporcionar una solución a la necesidad de desarrollar EIIA en contextos dinámicos pero sin renunciar al tratamiento de la información heterogénea; es decir, manteniendo un Marco de Heterogéneo de Evaluación que permita a los

expertos proveer sus preferencias en diferentes dominios de expresión en cada uno de los múltiples períodos de decisión que se consideren en un problema de EIHA dinámico. Con esta perspectiva, en este apartado presentaremos el Modelo de Evaluación de la Importancia del Impacto Ambiental con Información Heterogénea en Contextos Dinámicos (MHD-EIHA).

5.3.1. Esquema General

El nuevo modelo de EIHA en contextos dinámicos, se define para gestionar situaciones que requieren una valoración general de la evolución de los impactos ambientales de uno o varios proyectos. La Figura 5.5 muestra el esquema general del MHD-EIHA que como puede observarse, al igual que el MH-EIHA, mantiene la estructura fundamental de un problema de Análisis de Decisión, donde las distintas fases del modelo básico se modificarán y se utilizarán herramientas diferentes para llegar a la importancia global del proyecto.

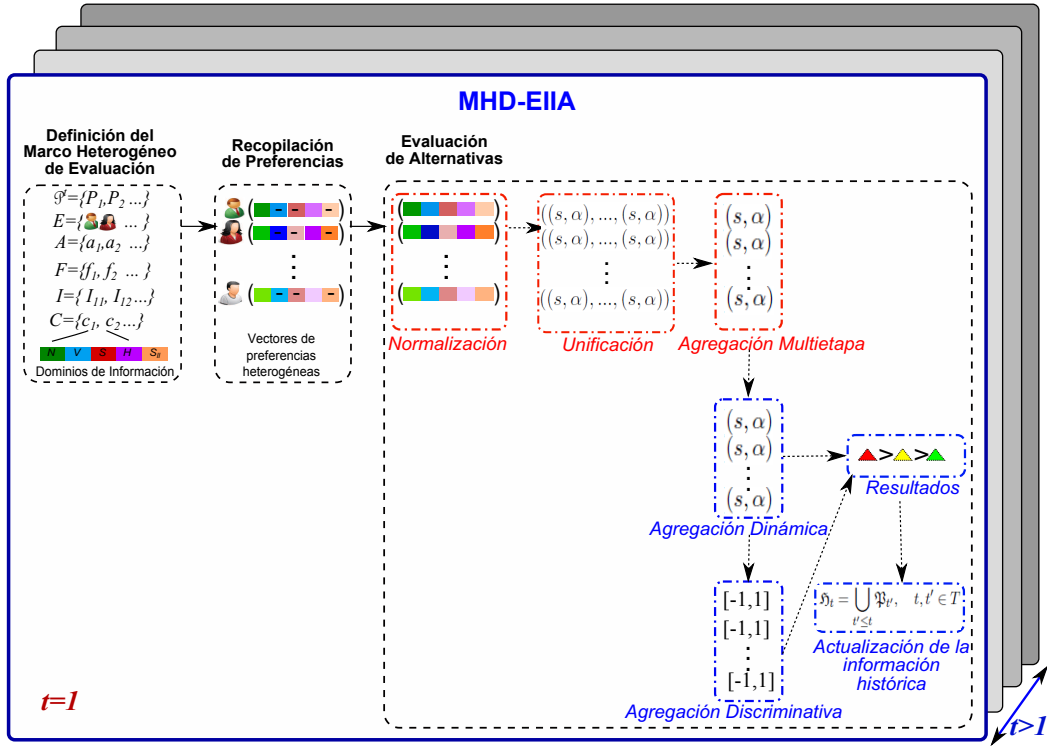


Figura 5.5: Esquema general del MHD-EIHA

Puede decirse entonces que el MH-EIIA ha sido extendido de forma tal que permita la realización de la EIIA en múltiples períodos, donde cada evaluación tendrá en cuenta las anteriores tomando como base el MD-TDD.

Se mantienen las fases principales del MH-EIIA, lo que indica que en cada período de decisión se podrá redefinir el Marco de Heterogéneo de Evaluación y de esta forma modificar el conjunto de proyectos a ser evaluados, los criterios y los pesos asociados, los expertos involucrados en la evaluación e incluso, los dominios de expresión que serán utilizados para declarar las preferencias. De igual forma en cada período será necesario recopilar las preferencias de los expertos y también evaluar las alternativas.

Los cambios fundamentales para la EIIA en contextos dinámicos, se incluyen en la tercera fase. La Agregación Multietapa permitirá obtener la importancia no dinámica de los impactos ambientales del proyecto. Posteriormente será necesario calcular la importancia dinámica de los impactos ambientales y si existieran coincidencias en estos valores para varios proyectos, será necesario en tales casos calcular además el Índice Discriminativo Dinámico. Estos últimos valores, se emplearán para obtener el ranking de proyectos en cada período de decisión que a su vez permitirá, de acuerdo con la política de retención predefinida, actualizar la información del conjunto histórico de proyectos.

A continuación, describiremos en detalle como se realizan cada una de estas fases en el modelo propuesto para $T = \{1, 2, \dots\}$, que es el conjunto de momentos de decisiones discretos que se tienen en cuenta en el problema de EIIA.

5.3.2. Definición del Marco Heterogéneo de Evaluación

Para la definición del Marco de Heterogéneo de Evaluación, mantenemos el interés en permitir la utilización de diferentes dominios de expresión, según la naturaleza de los criterios empleados para la caracterización de los impactos ambientales. Es por ello que resulta importante preservar el carácter heterogéneo de nuestro marco de trabajo.

Es pertinente destacar que intervienen nuevos elementos en la definición del problema:

- $\mathfrak{P}^t = \{P_r | r \in (1, \dots, v), v > 1\}$ es el conjunto de proyectos a evaluar en cada momento de decisión $t \in T$.

- La información acerca del conjunto de proyectos a través del tiempo es transmitida de un período al siguiente en un conjunto histórico $\mathfrak{H}_t$ definido como:

$$\mathfrak{H}_0 = \emptyset, \quad \mathfrak{H}_t = \bigcup_{t' \leq t} \mathfrak{P}^{t'}, \quad t, t' \in T. \quad (5.4)$$

5.3.3. Recopilación de Preferencias

En esta fase, los expertos proporcionan su conocimiento a través de vectores de utilidad que contienen la valoración para cada criterio de los impactos evaluados en uno de los dominios de expresión definidos en el Marco de Heterogéneo de Evaluación.

5.3.4. Evaluación de Alternativas

La fase de Evaluación de Alternativas puede considerarse la más compleja en los modelos propuestos para el Análisis de Decisión debido a que en ella tienen lugar los procesos de manipulación de la información, en primer lugar para convertirla en datos homogéneos y agregables (Normalización y Unificación) y en segundo lugar para transformar el conjunto de estos datos en un elemento único representativo de cada alternativa (Agregación) que luego se emplea para presentar los resultados del proceso (Resultados).

En el MHD-EIIA se modifica sustancialmente la fase de Evaluación de Alternativas con el propósito fundamental de implementar y formalizar el mecanismo dinámico de retroalimentación entre los períodos. La Figura 5.6 muestra la relación entre los modelos anteriores propuestos en esta memoria y el MHD-EIIA. Los pasos de Normalización y Unificación se desarrollan según el MH-EIIA. A continuación nos centramos en la caracterización del resto de los pasos.

5.3.4.1. Agregación Multietapa

Este paso se desarrolla según el paso **A)** del MH-EIIA, descrito en el epígrafe 4.1.4.3 y de igual manera se busca obtener un valor global de importancia para los proyectos evaluados atendiendo a las valoraciones proporcionadas por el conjunto de expertos. A este valor, $\mathfrak{J}_t(P_i) = (s_g, \alpha_g)$, lo hemos denominado *importancia no dinámica de los impactos ambientales del proyecto* debido a que sólo se tienen

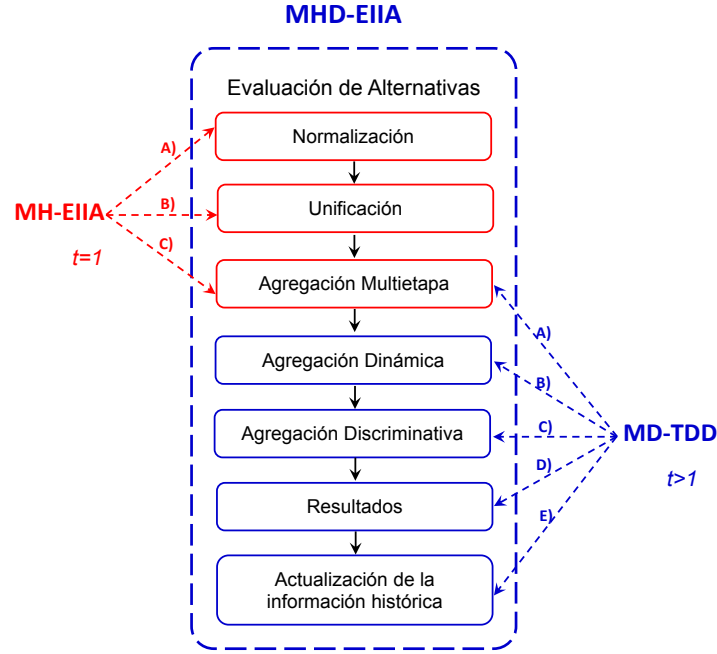


Figura 5.6: La evaluación de las alternativas en el MHD-EIIA

en cuenta en su obtención, las valoraciones recopiladas en el período de decisión actual. Evidentemente también se corresponde con el paso **A)** del MD-TDD que no es más que el *cálculo de una evaluación no dinámica*.

5.3.4.2. Agregación Dinámica

Este paso se corresponde con el paso **B)** del MD-TDD y le hemos llamado Agregación Dinámica porque como resultado obtendremos el valor de la *importancia dinámica de los impactos ambientales del proyecto*, $\mathcal{I}'_t(P_i)$, a través de la siguiente ecuación:

$$\mathcal{I}'_t(P_i) = \begin{cases} \mathcal{I}_t(P_i), & P_i \in \mathfrak{P}^t \setminus \mathfrak{H}_{t-1} \\ \Omega(\mathcal{I}'_{t-1}(P_i), \mathcal{I}_t(P_i)), & P_i \in \mathfrak{P}^t \cap \mathfrak{H}_{t-1} \\ \mathcal{I}'_{t-1}(P_i), & P_i \in \mathfrak{H}_{t-1} \setminus \mathfrak{P}^t. \end{cases} \quad (5.5)$$

5.3.4.3. Agregación Discriminativa

Cuando se obtienen valores iguales de $\mathcal{I}'_t(P_i)$, será necesario clacular un Índice Discriminativo Dinámico para diferenciar el desempeño en el tiempo de estos proyectos. Este paso que hemos denominado Agregación Discriminativa, se corresponde con el paso **C)** del MD-TDD y permitirá obtener los índices según la ecuación:

$$\mathcal{I}^*_t(P_i) = \begin{cases} \mathcal{D}_t(P_i), & P_i \in \mathfrak{P}^t \setminus \mathfrak{H}_{t-1} \\ \Upsilon(\mathcal{I}_{t-1}(P_i), \mathcal{D}_t(P_i)), & P_i \in \mathfrak{P}^t \cap \mathfrak{H}_{t-1} \\ \mathcal{I}'_{t-1}(P_i), & P_i \in \mathfrak{H}_{t-1} \setminus \mathfrak{P}^t. \end{cases} \quad (5.6)$$

donde $\mathcal{D}_t(P_i)$ es el cambio en el valor de la importancia no dinámica de un proyecto dada por la diferencia entre estos valores en el período anterior y el actual, como en la Ecuación (5.1).

5.3.4.4. Resultados

En la presentación final de los resultados, transformamos la información global sobre los proyectos en una ordenación global de los mismos. Para llevar a cabo esta fase, es necesario definir un criterio que permita establecer un orden entre el conjunto de proyectos evaluados en cada período.

Una vez que se han obtenido los valores de importancia dinámica de cada proyecto, y los índices discriminativos para aquellos cuyas importancias dinámicas coincidan, el conjunto de proyectos evaluados en el período podrá ser ordenado según las siguientes políticas:

1. Si no hay coincidencias en los valores de $\mathcal{I}'_t(\cdot)$, el ranking se obtiene tomando $\mathcal{I}'_t(P_i)$ como criterio de precedencia para todo $P_i \in \mathfrak{P}^t$.
2. Si no, para todo $P_i, P_j \in \mathfrak{P}^t$: $\mathcal{I}'_t(P_i) = \mathcal{I}'_t(P_j)$, el ranking se obtiene tomando $\mathcal{I}^*_t(\cdot)$ como criterio de precedencia para $P_i, P_j \in \mathfrak{P}^t$.

5.3.4.5. Actualización de la Información Histórica

En este paso debe definirse la política de retención a utilizar para la selección de los proyectos que serán *recordados* en este período en $\mathfrak{H}_t$. Para más detalles puede consultar la sección 5.2 de esta memoria.

5.4. Aplicación del MHD-EIIA

En este apartado mostraremos cómo aplicar el MHD-EIIA a un problema en el que se necesita seleccionar el proyecto que mayores afectaciones provoca en el medio ambiente según las evaluaciones realizadas en diferentes períodos. En este caso no utilizaremos un caso de estudio real por no contar con los datos necesarios sobre las evaluaciones de varios proyectos a lo largo del tiempo; emplearemos un escenario no real y general.

5.4.1. Descripción del Problema de EIIA

Supongamos que se tiene un conjunto de proyectos, a los que se realizan evaluaciones anuales. Cada año al momento de la evaluación pueden ser diferentes las actividades en ejecución y por tanto, los impactos evaluados. A su vez, nuevos proyectos pueden incorporarse para ser evaluados. También cada año se emite una valoración general sobre la evolución del proyecto.

- Conjunto inicial de proyectos y número de períodos.

$\mathfrak{P}^t = \{P_1, P_2, P_3, P_4\}$ es el conjunto de proyectos a ser evaluados durante tres años $T = \{1, 2, 3\}$.

- Política de retención.

La política de retención, dado el bajo número de alternativas a evaluar y períodos a considerar, será la de mantener en el conjunto histórico, la información de todas las alternativas, es decir, de un período a otro, se recordarán todos los proyectos.

- Debido a que, como hemos explicado, las evaluaciones no dinámicas se corresponden con los resultados del MH-EIIA para una iteración determinada, nos concentraremos en el resto de los pasos y no se mostrarán los detalles sobre el cálculo de los valores globales de importancia de los proyectos en cada período. La Figura 5.7 muestra la evolución de la importancia no dinámica, $\mathfrak{I}_t(P_i)$, de los proyectos durante los tres años evaluados.

- Agregación Dinámica.

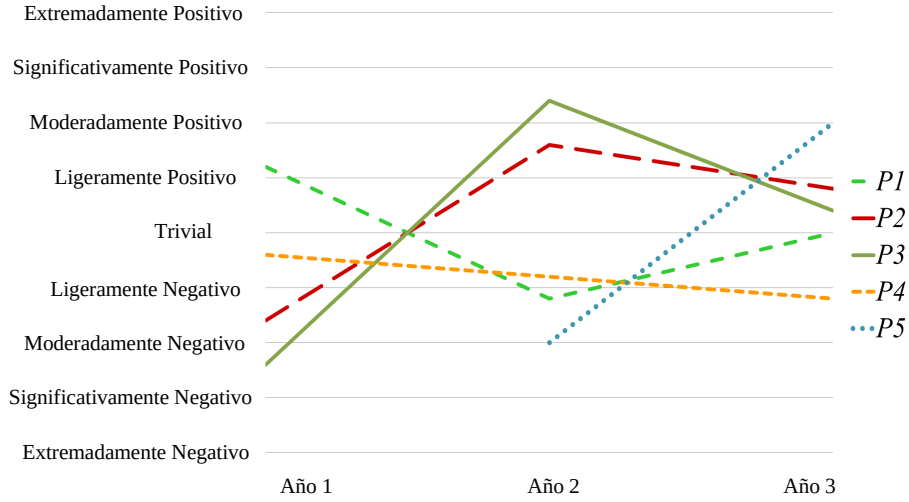


Figura 5.7: Comportamiento de la Importancia no Dinámica, $\mathfrak{I}_t(P_i)$, de los proyectos durante los tres años

En la Agregación Dinámica, para el cálculo de los valores de importancia dinámica de los impactos ambientales de cada proyecto, $\mathfrak{I}'_t(P_i)$, se empleará un operador uninorma debido a la necesidad de reforzar las tendencias tanto de evaluaciones altas como bajas. Para reflejar este comportamiento de refuerzo total, puede emplearse una uninorma, como la presentada en la Ecuación (B.6) del Apéndice B, sin embargo, debido al tipo de información que manejamos, será necesario adaptarla para operar con 2-tuplas lingüísticas.

Definición 10 Sean $(s_x, \alpha_x), (s_y, \alpha_y) \in S$ dos 2-tuplas, S un CTL de granularidad $g + 1$ y $U : [0, 1]^2 \rightarrow [0, 1]$ un operador de agregación uninorma. La uninorma $\bar{U}$ extendida para 2-tupla es una función $\bar{U} : \tilde{S}^2 \rightarrow \tilde{S}$ definida como:

$$\bar{U}((s_x, \alpha_x), (s_y, \alpha_y)) = \Delta \left(U \left(\frac{\Delta^{-1}(s_x, \alpha_x)}{g}, \frac{\Delta^{-1}(s_y, \alpha_y)}{g} \right) \cdot g \right) \quad (5.7)$$

Así, a partir de la uninorma de la Ecuación (B.6) y fijando $e = 0.5$ como elemento neutro, podemos obtener una uninorma extendida para 2-tuplas lingüísticas como sigue:

$$\overline{U}_{\Pi}((s_x, \alpha_x), (s_y, \alpha_y)) = \Delta \left(\left[\frac{\frac{\Delta^{-1}(s_x, \alpha_x)}{g} \cdot \frac{\Delta^{-1}(s_y, \alpha_y)}{g}}{\frac{\Delta^{-1}(s_x, \alpha_x)}{g} \cdot \frac{\Delta^{-1}(s_y, \alpha_y)}{g} + 0.5 \cdot (1 - \frac{\Delta^{-1}(s_x, \alpha_x)}{g} - \frac{\Delta^{-1}(s_y, \alpha_y)}{g})} \right] \cdot g \right) \quad (5.8)$$

■ Agregación Discriminativa.

Debido a que el Índice Discriminativo Dinámico no es una evaluación de la alternativa sino un coeficiente que describe o caracteriza el comportamiento de la evaluación no dinámica a través del tiempo, no consideramos pertinente que también deba expresarse como un término lingüístico en S'_T . Por tanto se mantendrá como un coeficiente numérico.

Para calcular el Índice Discriminativo Dinámico de cada proyecto, $\mathfrak{I}_t^*(P_i)$, se empleará la Función de Combinación de Van Melle $\Upsilon_{VM} : [-1, 1] \rightarrow [-1, 1]$ modificada como en [193] tal y como muestra la Ecuación (5.10).

Para calcular el cambio de la evaluación no dinámica, proponemos normalizar los valores lingüísticos en $[0, 1]$ como se muestra en la Ecuación (5.9).

$$\mathfrak{D}_t(P_i) = \begin{cases} 0, & P_i \in \mathfrak{P}_t \setminus \mathfrak{H}_{t-1} \\ \frac{\Delta(\mathfrak{I}_t^*(P_i)) - \Delta(\mathfrak{I}_{t-1}^*(P_i))}{g}, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (5.9)$$

$$\Upsilon_{VM}(x, y) = \begin{cases} x + y - xy, & \text{si } \min\{x, y\} \geq 0 \\ x + y + xy, & \text{si } \max\{x, y\} \leq 0 \\ \frac{x+y}{1-\min\{|x|, |y|\}}, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (5.10)$$

La Función de Combinación de Van Melle exhibe propiedades similares a las uninormas (ver Figura 5.8), y puede reflejar las actitudes indicadas anteriormente, por lo tanto, se propone su uso para calcular nuestro índice. Por un lado, proporciona la naturaleza dinámica para el cálculo del índice por medio de la propiedad de asociatividad y, por otro lado, puede modelar las actitudes optimista, pesimista y promedio en el proceso de agregación por medio de la propiedad de refuerzo.

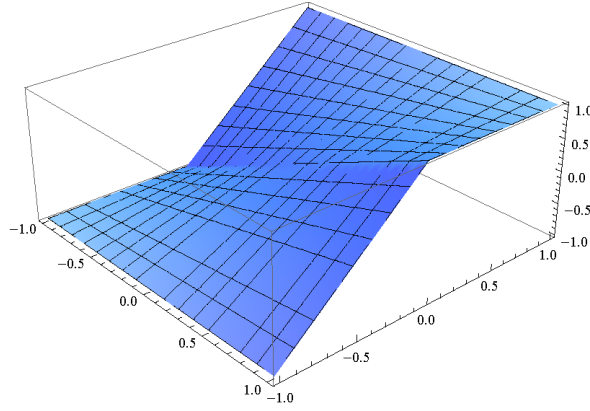


Figura 5.8: Función de Combinación de Van Melle

5.4.2. Resolución del Problema de EIIA

La Figura 5.9 ilustra cómo llegar a la solución del problema a partir de los valores lingüísticos que se obtienen como resultado del MH-EIIA.

En la Tabla 5.4 se muestran los resultados obtenidos, a partir de los valores de importancia no dinámica de los impactos ambientales del proyecto $\mathfrak{I}_t(P_i)$ (columna 3), para la importancia dinámica $\mathfrak{I}'_t(P_i)$ (columna 4) y el Índice Discriminativo Dinámico $\mathfrak{I}^*_t(P_i)$ (columna 5). En el caso de los valores de importancia no dinámica, para el segundo y tercer años, al lado del valor $\mathfrak{I}_t(P_i)$ aparece una flecha doble de color verde, que indica una mejora con respecto al año anterior, o de color rojo, que indica un decremento con respecto al año anterior.

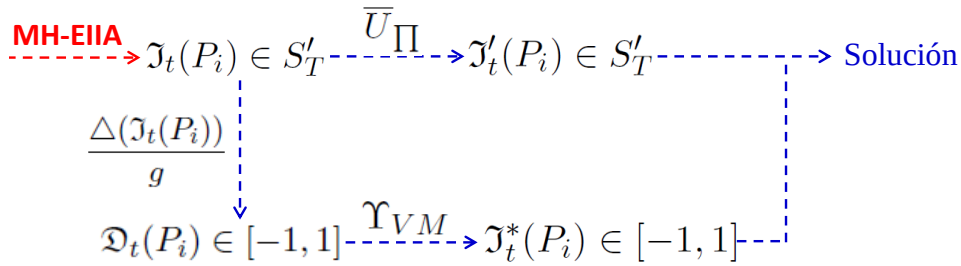


Figura 5.9: Pasos para la resolución del problema

Tabla 5.4: Resultados en cada año.

t	P_i	$\mathfrak{I}_t(P_i)$	$\mathfrak{I}'_t(P_i)$	$\mathfrak{I}^*_t(P_i)$
1	P_1	(LP,0.20)	(LP,0.20)	0
	P_2	(MN,0.40)	(MN,0.40)	0
	P_3	(MN,-0.40)	(MN,-0.40)	0
	P_4	(T,-0.40)	(T,-0.40)	0
2	P_1	(LN,-0.20)↓	(T,0)	-0.3000
	P_2	(MP,-0.40)↑	(T,0)	0.4000
	P_3	(MP,0.40)↑	(T,0)	0.6000
	P_4	(LN,0.20)↓	(LN,-0.18)	-0.0500
	P_5	(MN,0)	(MN,0)	0
3	P_1	(T,0)↑	(T,0)	-0.1765
	P_2	(LP,-0.20)↓	(LP,-0.20)	0.3333
	P_3	(T,0.40)↓	(T,0.40)	0.4667
	P_4	(LN,-0.20)↓	(MN,-0.18)	-0.0975
	P_5	(MP,0)↑	(T,0)	0.5000

A continuación, explicamos los pasos más importantes del MHD-EIIA para llegar a estos resultados.

Año 1: Para $t = 1$ sólo se calcula el valor de la importancia no dinámica de los impactos ambientales del proyecto $\mathfrak{I}_1(P_i)$ pues al no existir información histórica, no es necesario calcular las evaluaciones dinámicas ni el índice. Con estos datos ordenamos los proyectos $P_1 \succ P_4 \succ P_2 \succ P_3$ por lo que es P_3 el proyecto que causa mayores afectaciones en el medio ambiente.

Año 2: En $t = 2$ se inserta un nuevo proyecto, P_5 , en el sistema de evaluación ambiental. Primero calculamos las evaluaciones dinámicas como en el siguiente ejemplo, correspondiente a P_1 :

$$\frac{\Delta^{-1}(LP, 0.20)}{g} = \frac{5.20}{8} = 0.65$$

$$\frac{\Delta^{-1}(LN, -0.20)}{g} = \frac{2.80}{8} = 0.35$$

$$\mathfrak{J}'_2(P_1) = \Delta\left(\frac{0.5 \times 0.65 \times 0.35}{0.65 \times 0.35 + (1 - 0.65 - 0.35)}\right) = \Delta(4) = (T, 0)$$

Debido a que hay coincidencias en las evaluaciones dinámicas, para discriminar estos proyectos, empleamos el índice que para $t = 2$ se corresponde con el cambio en la evaluación no dinámica:

$$\mathfrak{J}_2^*(P_1) = \mathfrak{D}_2(P_1) = \frac{\Delta(\mathfrak{J}'_2(P_1)) - \Delta(\mathfrak{J}'_1(P_1))}{8} =$$

$$\frac{\Delta(LN, -0.20) - \Delta(LP, 0.20)}{8} = \frac{-2.4}{8} = -0.3$$

Con estos datos procedemos a ordenar los proyectos $P_3 \succ P_2 \succ P_1 \succ P_4 \succ P_5$, por lo que P_5 es el proyecto que integralmente causa mayores afectaciones en el medio ambiente.

Podemos verificar el comportamiento de la agregación en el cálculo de la importancia dinámica en diferentes situaciones:

- Refuerzo total, con un comportamiento promedio de la agregación: (a) para P_1 , con una importancia dinámica anterior mayor que el elemento neutro 0.5 pero con una importancia no dinámica actual menor que 0.5 y (b) para P_2 y P_3 que manifiestan una tendencia contraria.
- Refuerzo hacia abajo: para P_4 que tiene ambos valores menores que 0.5.

Año 3: En $t = 3$ se mantienen los cinco proyectos anteriores y se calcula la importancia dinámica de cada uno. Nuevamente existen proyectos con iguales evaluaciones dinámicas por lo que es necesario calcular el índice y luego ordenar los proyectos según ambos valores para obtener el ranking para este período: $P_2 \succ P_3 \succ P_5 \succ P_1 \succ P_4$ y resulta P_4 el proyecto que causa mayores prejuicios en el medio ambiente.

Podemos verificar el comportamiento de la agregación en el cálculo del índice en diferentes situaciones:

- Refuerzo de la tendencia en el decremento de la importancia no dinámica del proyecto: para P_4 con un índice negativo precedente y un decremento de la de la importancia no dinámica en el período actual. En este caso el índice para el período actual es menor que ambos valores.
- Comportamiento promedio: (a) para P_1 índice precedente negativo pero con un incremento de la evaluación en el período actual y (b) para P_2 y P_3 que por el contrario han experimentado un decremento de la importancia no dinámica pero que tienen un índice negativo en el período anterior. En estos casos, el índice para el período actual se encuentra entre ambos valores agregados.

Estos diferentes comportamientos del índice, demuestran la eficacia de su uso habiendo permitido que el mayor valor corresponda siempre al proyecto de mayores incrementos de la importancia del impacto ambiental.

5.4.3. Análisis de Resultados

En la Tabla 5.5 se muestran los ranking de proyectos obtenidos mediante los diferentes modelos para cada uno de los años evaluados.

Tabla 5.5: Ranking de proyectos obtenidos mediante diferentes modelos

	t=1	t=2	t=3
M1	$P_1 \succ P_4 \succ P_2 \succ P_3$	$P_3 \succ P_2 \succ P_4 \succ P_1 \succ P_5$	$P_5 \succ P_2 \succ P_3 \succ P_1 \succ P_4$
M2	-	$P_3 = P_2 = P_1 \succ P_4 \succ P_5$	$P_2 \succ P_3 \succ P_5 = P_1 \succ P_4$
M3	-	$P_3 \succ P_2 \succ P_1 \succ P_4 \succ P_5$	$P_2 \succ P_3 \succ P_5 \succ P_1 \succ P_4$

M1 Se refiere a los resultados del MH-EIIA, obtenidos de manera independiente en cada año y que no tienen en cuenta el modelado dinámico del análisis de decisión. La importancia de cada proyecto, $\mathcal{I}_t(P_i)$, sólo depende de las valoraciones de los expertos para el año evaluado, sin tener en cuenta el perfil temporal de los proyectos.

M2 Se refiere a los resultados utilizando el modelo de Campanella y Ribeiro extendido para el tratamiento de información lingüística en 2-tuplas. El orden

de los proyectos se obtiene a partir de los valores de su importancia dinámica, $\mathcal{J}'_t(P_i)$. Este valor permite tener en cuenta las evaluaciones no dinámicas anteriores, pero hay casos en los que se obtienen iguales resultados. Por ejemplo, en el año 2, hay un decremento en la importancia del proyecto P_1 , mientras los proyectos P_2 y P_3 decrementan su importancia; sin embargo obtienen igual valor de la importancia dinámica, lo que demuestra las dificultades de este modelo. Para el tercer año de forma similar, se obtienen iguales valores de importancia dinámica para los proyectos P_1 y P_5 a pesar de que han tenido diferente comportamiento a lo largo del tiempo.

M3 Se refiere a los resultados empleando el nuevo MHD-EIIA donde el ranking final se obtiene como se ha descrito en la sección anterior, integrando nuestro índice $\mathcal{J}^*_t(P_i)$. Como puede observarse, en todos los casos se ha podido obtener un orden que tiene en cuenta los decrementos e incrementos en la importancia de los proyectos evaluados.

Estos resultados nos permiten contrastar la hipótesis de partida de nuestra investigación, pues hemos mejorado el método de EIIA mediante un modelo que posibilita realizar evaluaciones que *tengan en cuenta los cambios en el tiempo de los impactos ambientales*.

Capítulo 6

Sistema para la Evaluación de la Importancia del Impacto Ambiental

En este capítulo se presenta un software que soporta el MH-EIIA propuesto en esta memoria de investigación y que hemos denominado SEVIIA. Para ello describiremos la arquitectura del SEVIIA así como las herramientas y lenguajes utilizados en su desarrollo. Además explicaremos los módulos y funcionalidades del sistema.

6.1. Arquitectura

El patrón de arquitectura utilizado ha sido el N-Capas, que divide el procesamiento en niveles independientes que se distribuyen entre el cliente y el servidor. Entre las ventajas de la arquitectura en capas se encuentran las siguientes:

- Soporta un diseño basado en niveles de abstracción crecientes, lo cual permite a los implementadores la partición de un problema complejo en una secuencia de pasos incrementales.
- El desarrollo se lleva a cabo en varios niveles y en el caso de que exista algún error o la necesidad de algún cambio obligatorio, sólo es necesario cambiar el nivel en cuestión, sin afectar el correcto funcionamiento del resto del sistema.

- Posibilita la reutilización de código debido a las características propias de su implementación en capas.

La Figura 6.1 representa la arquitectura N-Capas basada en el *Spring Framework* que se utilizó en el SEVIIA.

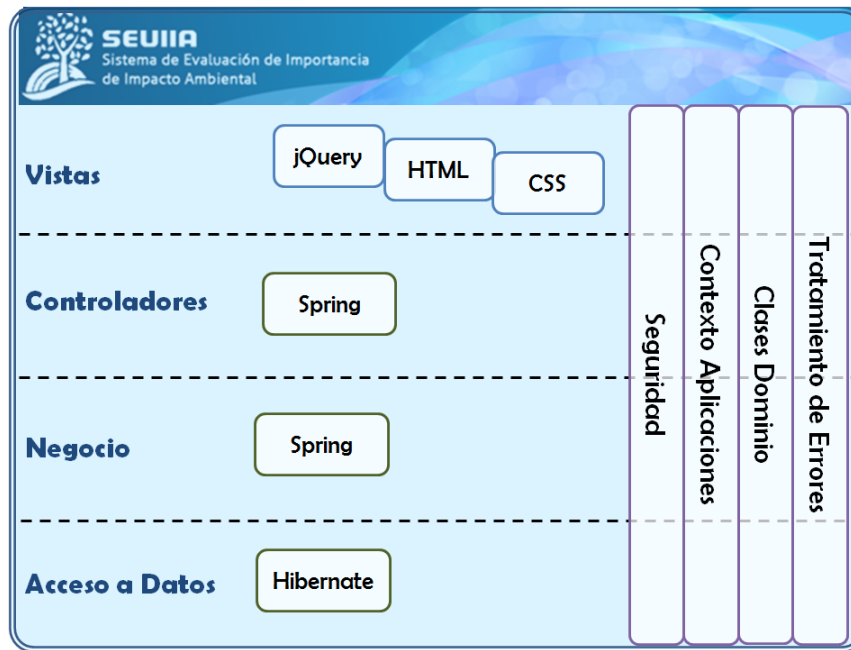


Figura 6.1: Arquitectura en 4-capas basada en el *Spring Framework*.

A continuación se describen brevemente las cuatro capas del SEVIIA:

Capa Vistas: contiene las clases encargadas de garantizar la interacción del usuario con el sistema. Esta capa se comunica únicamente con la capa controladora a la cual envía los datos a través de los formularios.

Capa Controladores: es la encargada de recibir los eventos de entrada desde las vistas. Envía las peticiones a las clases del negocio que correspondan y devuelve los datos solicitados por el usuario a la capa vista.

Capa Negocio: se implementan todas las funcionalidades y métodos del sistema. Recibe las peticiones de los controladores y les da respuesta accediendo, si es necesario, a la capa DAO (*Data Access Object*) y devuelve los datos al controlador.

Capa de Objetos de Acceso a Datos: es la encargada de realizar las gestiones de la base de datos, su función es almacenar y devolver datos a la capa de negocio. La capa DAO permite independizar la lógica de negocio de la lógica de acceso a datos obteniendo mayor organización y flexibilidad en el sistema.

6.2. Herramientas y Lenguajes

6.2.1. Metodología de Desarrollo: Programación Extrema (XP)

XP, considerada una metodología ágil, se basa en la retroalimentación continua entre el cliente y el equipo de desarrollo y la comunicación fluida entre todos los participantes, utiliza además las historias de usuario para especificar los requisitos del software. Esta metodología fue seleccionada para guiar todo el proceso de desarrollo del software, debido entre otros factores, a sus bondades para equipos de desarrollo pequeños y un ciclo de desarrollo corto, dos características presentes en el desarrollo del SEVIIA.

6.2.2. Herramienta de Modelado: Visual Paradigm 8.0

Se utiliza para representar el modelado de los procesos del negocio del presente trabajo. Es una herramienta fácil de instalar y actualizar, multiplataforma y presenta capacidades de ingeniería directa e inversa. Potencia la reutilización del software y estandarización de la documentación. Permite modelar utilizando la notación para el Modelado de Procesos de Negocio.

6.2.3. Lenguajes de Programación

- Java 1.7.3: se emplea como un lenguaje de programación del lado del servidor. Java es multiplataforma, posee amplia compatibilidad con diferentes motores de base de datos y es de código libre, es distribuido lo que permite trabajar en ambiente de redes y contiene una gran biblioteca de clases para la utilización del protocolo TCP/IP, incluyendo HTTP, además permite el trabajo con diferentes framework como *Spring* e *Hibernate*.
 - HTML 5: se utiliza como lenguaje de programación en el lado del cliente HTML (*HyperText Markup Language*). Al ser portable, se pueden visualizar
-

las páginas con cualquier sistema operativo y, por supuesto también crearlas.

- **CSS3:** especifica la forma del diseño de los documentos (tanto XHTML como HTML) y ayuda a mejorar el posicionamiento web. Permite separar el contenido del diseño, siendo esto muy útil cuando se quiere cambiar un aspecto del diseño de un sitio web por el ahorro de tiempo y mayor uniformidad en el diseño.

6.2.4. Frameworks

Un framework es una estructura de archivos y utilidades que aceleran la programación de una aplicación informática y provee una metodología de trabajo que sistematiza y facilita la generación de formularios, funciones y módulos de uso común, permitiendo al desarrollador dedicar su atención hacia los aspectos específicos de cada aplicación.

- *jQuery:* Es un framework de *JavaScript*. Es compatible con CSS3 y con diferentes navegadores y facilita la programación del lado del cliente. Con *jQuery* se pueden producir páginas dinámicas en relativamente poco tiempo. El código fuente puede ser modificado y adaptado a nuestras necesidades siguiendo las políticas de las licencias.
 - *Bootstrap 2.0:* Posibilita simplificar el proceso de creación de diseños web. Ofrece una serie de plantillas CSS y de ficheros JavaScript que permiten crear interfaces funcionales y un diseño que pueda ser visualizado de forma correcta en distintos dispositivos y a diferentes escalas y resoluciones. Además admite una mejor integración con otros frameworks que se usan habitualmente, como por ejemplo *jQuery* y un diseño sólido basado en herramientas como CSS3/HTML.
 - *Spring Framework 3.0:* Es un framework de código abierto de desarrollo de aplicaciones para la plataforma Java, ligero en términos de tamaño y costes. Permite una separación entre el código de modelo de dominio y las formas web. Es flexible por su diseño como conjunto de módulos que pueden trabajar de forma independiente. Además mantiene un mínimo acoplamiento entre la aplicación y el propio framework de forma que podría ser desvinculada de
-

él sin demasiada dificultad. La mayor parte de *Spring framework* se puede distribuir en un único archivo *.jar*. Permite configurar y componer complejas solicitudes de los componentes más simples. Los objetos de aplicación son compuestos de forma declarativa, por lo general en un archivo XML.

- *Hibernate Framework 3.0*: Hibernate es un framework de Mapeo Objeto-Relacional para Java que facilita el mapeo de atributos entre una base de datos relacional tradicional y el modelo de objetos de una aplicación, mediante archivos declarativos (XML) o anotaciones en los *beans* de las entidades que permiten establecer estas relaciones. Facilita la persistencia de objetos Java en bases de datos relacionales y al mismo tiempo la consulta de estas bases de datos para obtener objetos.

6.2.5. Entorno Integrado de Desarrollo: *Eclipse-indigo*

Eclipse facilita las tareas de edición, compilación y ejecución de programas durante su fase de desarrollo. Es una plataforma ligera para componentes de software que proporciona, en el caso del lenguaje Java, el *Java Development Kit* (JDK). Se decidió utilizar Eclipse debido a que es multiplataforma, permite trabajar con distintos tipos de framework como Spring e Hibernate y se presenta como una alternativa de fácil acceso.

6.2.6. Sistema Gestor de Base de Datos: *PostgreSQL 8.4.2*

PostgreSQL es un sistema que brinda la posibilidad de contar con una alta calidad en la seguridad de la información manejada, posee una arquitectura cliente-servidor y posibilita la optimización de consultas. Este gestor de base de datos tiene transacciones, integridad referencial, vistas y multitud de funcionalidades, además de ser una aplicación de código abierto. Además permite el trabajo con el lenguaje de programación *Java*, así como la posibilidad de utilizar un framework como *Hibernate*.

6.2.7. Servidor Web: *Apache Tomcat 7.0.23*

El servidor web *Apache* es una tecnología rápida y estable. Se caracteriza por una arquitectura modular que permite construir un servidor que responda a los

requisitos del usuario. Sirve para atender y responder a las diferentes peticiones, proporcionando los recursos que soliciten usando los protocolos HTTP o HTTPS. El servidor web se encarga de contestar a estas peticiones de forma adecuada, entregando como resultado una página web o información de todo tipo de acuerdo a los comandos solicitados. Su rendimiento consume menos recursos del sistema en comparación con otros servidores.

6.3. Usuarios y Funcionalidades del SEVIIA

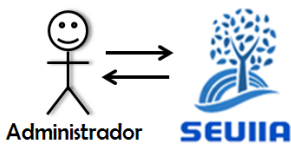
Usuario	Descripción
 Administrador	Este usuario es el encargado de diseñar el proceso de EIIA, es decir, de conformar el Marco Heterogéneo de Evaluación a través de la definición de los conjuntos de acciones y factores de un proyecto, la identificación de los impactos y su naturaleza, los criterios a evaluar, los dominios de información y la correspondencia entre estos últimos elementos.
 Experto	Será el encargado de valorar los impactos de un proyecto que se encuentre a su disposición en el SEVIIA, es decir, tendrá preasignados uno o varios proyectos de los que deberá evaluar los impactos ambientales identificados. Antes de que un experto pueda valorar un impacto deberá estar registrado en el sistema. De esta forma se le presentarán a cada experto, los impactos del proyecto adecuado.

Tabla 6.1: Usuarios de SEVIIA

SEVIIA ha sido concebido para dos tipos fundamentales de usuarios, Administrador y Experto, que como se verá más adelante, tienen distintas responsabilidades una vez registrados en el sistema. La descripción de ambos usuarios se muestra en

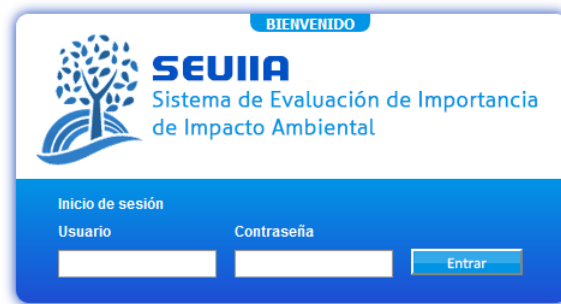


Figura 6.2: Página principal para registrarse en el SEVIIA

la Tabla 6.1.

En la aplicación la seguridad está respaldada por *Spring Security*, permitiendo que el acceso a la aplicación sea sólo para las personas autorizadas y a las funcionalidades correspondientes según su rol dentro del sistema. Con el empleo de *Spring Security* se controla el manejo de sesiones (Administrador y Experto), además evita acceder al sistema a un usuario que ya esté autenticado y establece un tiempo de expiración de las sesiones. Así se garantiza la integridad de la información dentro del sistema.

Los usuarios pueden acceder al SEVIIA a través de la página principal que se muestra en la Figura 6.2.

SEVIIA tiene dos módulos que permiten soportar los pasos de cada fase del MH-EIIA. A continuación describiremos brevemente las funcionalidades de cada uno de ellos.

6.3.1. Subsistema Administración

El Subsistema Administración tiene como objetivo la definición y guía de la EIIA y como se muestra en la Figura 6.3, permite al Administrador de la EIIA definir el Marco Heterogéneo de Evaluación mediante las siguientes funcionalidades:

1. Gestionar usuarios: Con esta funcionalidad se podrá adicionar, editar y eliminar los usuarios del sistema. Como se ha descrito anteriormente pueden



Figura 6.3: Página principal para el Administrador

tener dos roles diferentes (Administrador y Experto). Además posibilita el cambio de contraseña para el usuario autenticado. La Figura 6.4 muestra los atributos que se recogen para la creación de un usuario.

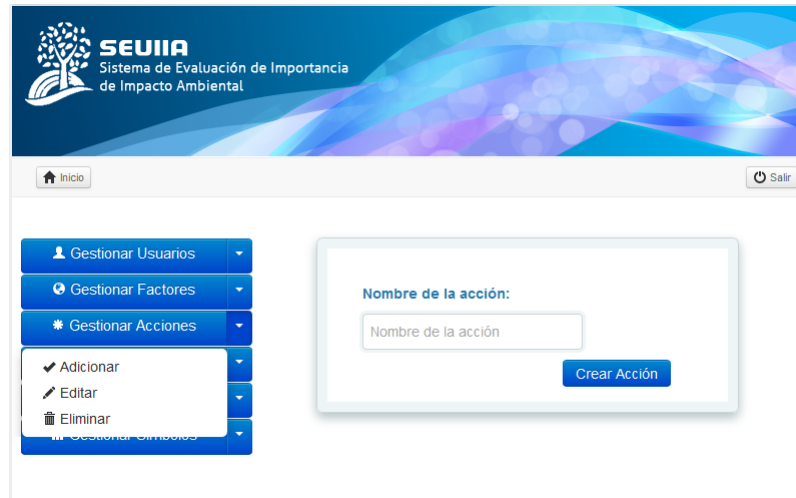
Figura 6.4: Formulario para añadir un nuevo usuario del SEVIIA

2. Gestionar factores: Con esta funcionalidad se podrán adicionar, editar, eliminar los factores ambientales. Para adicionar un nuevo factor es necesario introducir en la interfaz el nombre y su peso, que para este caso se denomina UIP como en el método de Conesa (Figura 6.5).

The image shows a web application interface for 'SEVIA Sistema de Evaluación de Importancia de Impacto Ambiental'. On the left, there is a vertical menu with options: 'Gestionar Usuarios', 'Gestionar Factores', 'Gestionar Acciones', 'Gestionar Dominios', and 'Gestionar Símbolos'. The 'Gestionar Factores' option is expanded, showing sub-options: 'Adicionar', 'Editar', and 'Eliminar'. On the right, a modal form is displayed for adding a new factor. It contains two text input fields: 'Nombre del factor' and 'Valor UIP'. Below these fields is a blue button labeled 'Crear Factor'. The top of the interface has a header with the SEVIA logo and name, and navigation buttons for 'Inicio' and 'Salir'.

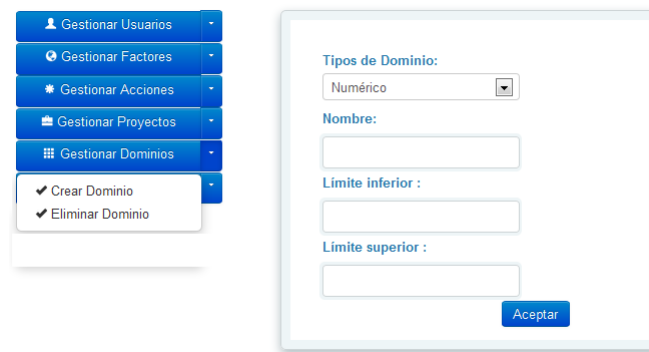
Figura 6.5: Formulario para añadir un nuevo factor ambiental

3. Gestionar acciones: Con esta funcionalidad se podrán adicionar, editar, eliminar las acciones impactantes. Para adicionar una nueva acción sólo es necesario introducir su nombre en la interfaz (Figura 6.6).
4. Gestionar dominios: Con esta funcionalidad se podrán crear y eliminar dominios de información, estos serán usados por los expertos para brindar sus preferencias. Los tipos de dominios disponibles son lingüísticos, numéricos e intervalares. Si se desea adicionar un CTL será necesario introducir en la interfaz el atributo nombre del dominio, escoger la cantidad de etiquetas y el nombre de cada una de ellas. Si se desea adicionar un dominio de información numérica o intervalar, será necesario llenar los campos nombre, límite inferior y límite superior. La Figura 6.7 muestra como ejemplo, el formulario para crear un dominio numérico.
5. Gestionar símbolos: Con esta funcionalidad se podrán crear, modificar y eliminar los criterios sobre los cuales los expertos emitirán su valoración. Para



The screenshot shows the SEVIIA (Sistema de Evaluación de Importancia de Impacto Ambiental) interface. At the top, there is a header with the SEVIIA logo and name. Below the header, there is a navigation bar with buttons for 'Inicio' and 'Salir'. The main content area features a sidebar menu on the left with options: 'Gestionar Usuarios', 'Gestionar Factores', 'Gestionar Acciones', 'Adicionar', 'Editar', 'Eliminar', and 'Gestionar Simbolos'. The 'Gestionar Acciones' option is selected, and a dropdown menu is open showing 'Adicionar', 'Editar', and 'Eliminar'. To the right of the sidebar, there is a form titled 'Nombre de la acción:' with a text input field labeled 'Nombre de la acción' and a 'Crear Acción' button.

Figura 6.6: Formulario para añadir una nueva acción

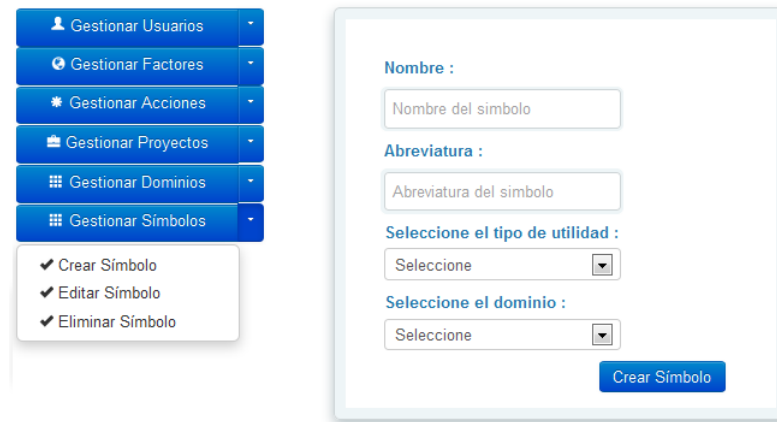


The screenshot shows the SEVIIA interface with the 'Gestionar Dominios' option selected in the sidebar menu. The dropdown menu for 'Gestionar Dominios' is open, showing 'Crear Dominio' and 'Eliminar Dominio'. To the right, there is a form titled 'Tipos de Dominio:' with a dropdown menu set to 'Numérico'. Below this, there are three text input fields labeled 'Nombre:', 'Límite inferior:', and 'Límite superior:'. A 'Aceptar' button is located at the bottom right of the form.

Figura 6.7: Formulario para añadir un dominio numérico

adicionar un criterio es necesario el nombre, su abreviatura, el tipo (costo, beneficio) y seleccionar el dominio de información en el que será valorado (Figura 6.8).

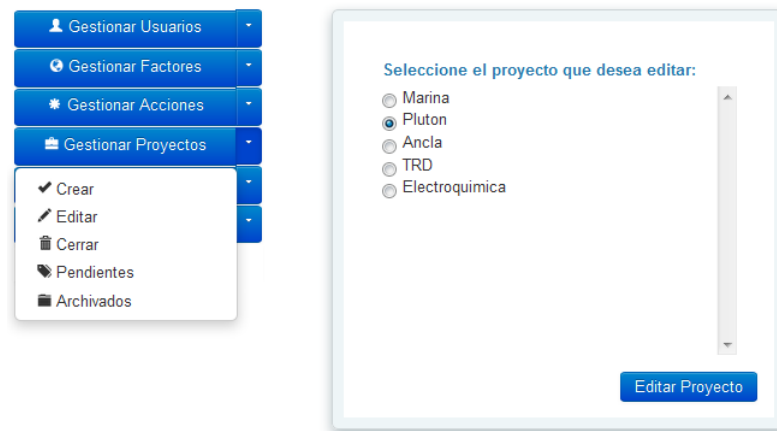
6. Gestionar proyectos: Con esta funcionalidad el Administrador finalmente puede crear, editar y consultar los proyectos en evaluación. Inicialmente es necesaria la gestión de todos los elementos que componen un proyecto de evaluación antes de crearlo. Para la creación se deben completar algunos datos como el nombre del proyecto, la entidad a la que pertenece, la fase en la que se encuentra, los expertos que participarán en su EIIA, las ac-



El formulario para añadir un nuevo criterio de evaluación se compone de una barra lateral de navegación y un formulario principal. La barra lateral contiene los siguientes ítems: 'Gestionar Usuarios', 'Gestionar Factores', 'Gestionar Acciones', 'Gestionar Proyectos', 'Gestionar Dominios' y 'Gestionar Símbolos'. El ítem 'Gestionar Símbolos' está seleccionado, mostrando un submenú con las opciones: '✓ Crear Símbolo', '✓ Editar Símbolo' y '✓ Eliminar Símbolo'. El formulario principal contiene los siguientes campos: 'Nombre :' con un campo de texto 'Nombre del símbolo'; 'Abreviatura :' con un campo de texto 'Abreviatura del símbolo'; 'Seleccione el tipo de utilidad :' con un menú desplegable que muestra 'Seleccione'; y 'Seleccione el dominio :' con un menú desplegable que muestra 'Seleccione'. En la parte inferior derecha del formulario hay un botón azul que dice 'Crear Símbolo'.

Figura 6.8: Formulario para añadir un nuevo criterio de evaluación

ciones impactantes, los factores impactados y los impactos ocasionados por las interacciones entre ellos y su naturaleza. Es decir, debe fijarse el Marco Heterogéneo de la EIIA. Este proceso se divide en interfaces diferentes, enlazadas entre sí, para hacerlo más intuitivo y organizado, como se muestra en la Figura 6.9.



Las funcionalidades mostradas al Administrador para gestionar proyectos consisten en una barra lateral de navegación y un formulario principal. La barra lateral contiene los siguientes ítems: 'Gestionar Usuarios', 'Gestionar Factores', 'Gestionar Acciones', 'Gestionar Proyectos', 'Gestionar Dominios' y 'Gestionar Símbolos'. El ítem 'Gestionar Proyectos' está seleccionado, mostrando un submenú con las opciones: '✓ Crear', '✎ Editar', '🗑 Cerrar', '📁 Pendientes' y '📁 Archivados'. El formulario principal contiene el título 'Seleccione el proyecto que desea editar:' y una lista de proyectos con radio botones: 'Marina', 'Pluton' (seleccionado), 'Ancla', 'TRD' y 'Electroquímica'. En la parte inferior derecha del formulario hay un botón azul que dice 'Editar Proyecto'.

Figura 6.9: Funcionalidades mostradas al Administrador para gestionar proyectos

El administrador puede además, listar todos los proyectos pendientes, es decir los proyectos que están en espera de ser evaluados por los expertos involucrados. En ese listado se muestra un porcentaje de completitud, que

representa el avance de la evaluación a partir del número de expertos que deben emitir sus preferencias. Una vez que el proyecto esté 100 % valorado por los expertos a los que ha sido asignado, puede ser sometido a la evaluación, que soporta la fase de Evaluación de Alternativas del MH-EIIA.

También es responsabilidad del Administrador cerrar los proyectos que por alguna razón no serán evaluados y archivar los proyectos que ya estén evaluados. Los proyectos terminados podrán ser archivados y en cualquier momento se podrá acceder a la matriz de importancia de los impactos que resultó de su evaluación. Además SEVIIA permite guardar la matriz de importancia de un proyecto terminado en formato excel.

6.3.2. Subsistema Evaluación

Este subsistema permite a los expertos proveer sus valoraciones respecto a los impactos, soportando así la fase de Recopilación de Preferencias del MH-EIIA. A continuación se describen las funcionalidades:

1. Cambiar contraseña: Los expertos inicialmente entran a la aplicación con el usuario y la contraseña que le entrega el Administrador del sistema. Luego podrán cambiar su contraseña en el menú desplegable de la parte lateral izquierda, donde aparecerán las acciones que este usuario puede realizar.
2. Mostrar proyectos asignados: Como muestra la Figura 6.10, esta funcionalidad permite al experto desplegar la lista de los proyectos que le han sido asignados para la valoración de los impactos.

Una vez que el experto ha seleccionado un proyecto, se mostrará su matriz de impactos para que el experto seleccione cada uno de ellos y evalúe cada uno de los criterios para cada impacto, como se muestra en la Figura 6.11.

The sidebar on the left contains a blue button labeled 'Opciones' with a dropdown arrow. Below it, there are two menu items: '✓ Proyectos Asignados' and '🔗 Cambiar Contraseña'.

The main panel is titled 'Seleccione un proyecto para iniciar EIA:'. It contains three radio button options: 'Nacional' (selected), 'Redblue', and 'Pluton'. A vertical scrollbar is on the right side of the panel. At the bottom right, there is a blue button labeled 'Evaluar'.

Figura 6.10: Formulario mostrado al experto para seleccionar un proyecto a evaluar

a) Evalúe cada impacto

Acciones / Factores	suelo	biota	aire
Generación de polvos y olores	Evaluar	Evaluar	Evaluar
Generación de desechos	Evaluar	Evaluar	Sin relación
Generación de ruidos	Evaluar	Evaluar	Evaluar

b) Introduzca su preferencia

RECUPERABILIDAD	...
EXTENSIÓN	...
INTENSIDAD	...
SINERGIA	...
PERIODICIDAD	...
EFFECTO	...
ACUMULACIÓN	...
REVERSIBILIDAD	
PERSISTENCIA	
MOMENTO	

Finalizar

Aceptar

Figura 6.11: Formulario mostrado al experto para la recopilación de sus preferencias

Capítulo 7

Conclusiones y Trabajos Futuros

En este capítulo se presenta un resumen de las principales conclusiones derivadas de las propuestas y resultados obtenidos en el transcurso de la investigación y que han sido descritos a lo largo de esta memoria. Además proponemos las líneas de investigación y trabajos futuros que nos planteamos desarrollar a partir de estos resultados. Finalmente, presentamos una lista de las publicaciones relacionadas con las aportaciones de nuestra investigación en este campo.

7.1. Conclusiones

La relevancia de la EIHA para la protección del medio ambiente y las limitaciones de los métodos tradicionales para llevar a cabo este proceso en estos contextos complejos, motivaron el desarrollo de esta investigación a partir del planteamiento de la hipótesis y los objetivos planteados en el Capítulo 1 de esta memoria. Teniendo en cuenta los retos planteados en dichos objetivos a lo largo de la investigación descrita en esta memoria hemos llevado a cabo distintas propuestas que nos han permitido llegar a las siguientes conclusiones:

- Con respecto al primer objetivo de la investigación, se realizó un estudio de los fundamentos teóricos de la EIHA, con énfasis especial en el análisis de los métodos convencionales de EIHA, lo que permitió identificar y confirmar por una parte, las limitaciones que estos presentan para modelar la complejidad

creciente de los problemas de EIHA, y por otra, también se pudieron mostrar las ventajas de modelar la EIHA como un problema basado en Análisis de Decisión.

- Respecto al manejo y modelado de información heterogénea en EIHA, se ha desarrollado el MH-EIHA, que permite solucionar problemas de EIHA y solventar las limitaciones de modelos convencionales previos, modelando de forma adecuada la incertidumbre relacionada con el proceso; posibilitando el tratamiento de información heterogénea, de acuerdo con el carácter de cada criterio; y obteniendo resultados de mayor interpretabilidad y mejor nivel representatividad del conocimiento, debido a que:
 - El esquema de Análisis de Decisión del MH-EIHA posibilita estructurar el problema de EIHA de manera lógica y clara, fijando el marco en el que se va a realizar la evaluación, recopilando la información necesaria para llevar a cabo la evaluación y, finalmente, obteniendo una valoración global de la importancia del proyecto evaluado y sus elementos.
 - La definición de diferentes dominios de información en el Marco de Heterogéneo de Evaluación, ofrece a los evaluadores una mayor flexibilidad para emitir sus valoraciones, pues estas pueden ser expresadas, de acuerdo a la naturaleza de cada criterio, mediante valores lingüísticos, numéricos o intervalares.
 - La integración de información difusa dudosa permite además modelar situaciones de alta incertidumbre donde los expertos pueden dudar entre diferentes valores en el momento de expresar sus preferencias respecto a un impacto ambiental.
 - El empleo de las gramáticas libres de contexto permite a los expertos además, el uso de expresiones lingüísticas comparativas que mejoran la expresividad de los expertos para aportar sus preferencias sobre los criterios para cada impacto cuando dudan entre varios términos lingüísticos.
 - Para el tratamiento de la información heterogénea, el MH-EIHA utiliza la fusión lingüística basada en el Modelo de Representación 2-tupla, lo que permite realizar procesos de Computación con Palabras de forma
-

precisa y obtener resultados de fácil interpretación, siendo este último elemento una premisa fundamental en el éxito de las EIHA.

- El proceso de ajuste de la importancia de los impactos, empleando las reglas de construcción de una jerarquía lingüística y una función de transformación, permite obtener nuevos valores lingüísticos para la importancia de los impactos ambientales que posibilitan tratar de forma diferenciada los impactos positivos y negativos en una misma escala lingüística.
- En relación con el desarrollo de EIHA en contextos dinámicos, hemos de indicar que, el análisis de los distintos enfoques de TDD, permitió identificar que la dificultad principal del enfoque general para TDD está dada por la ausencia de un mecanismo que posibilite diferenciar los cambios en el comportamiento de las evaluaciones de las alternativas en el tiempo.

Por esta razón, primero se desarrolló el MD-TDD que tiene como novedad primordial la definición de un Índice Discriminativo Dinámico que, mediante la utilización de operadores de agregación bipolares definidos en $[-1, 1]$ y asociativos, permite por una parte, modelar comportamientos diferentes respecto a los decrementos e incrementos de la evaluación de una alternativa en diferentes períodos y por otra, manejar tales valores sin necesidad de almacenarlos durante todos los períodos.

Se ha desarrollado además el MHD-EIHA, que proporciona una solución a la necesidad de modelar problemas de EIHA en contextos dinámicos pero sin renunciar al tratamiento preciso de la información heterogénea, debido a que:

- Mantiene un Marco Heterogéneo de Evaluación a lo largo de los múltiples períodos de decisión que se consideren en un problema de EIHA dinámico.
- Mantiene el modelado lingüístico de la información heterogénea.
- Permite, a través del Índice Discriminativo Dinámico, modelar diferentes actitudes con respecto a los cambios de la importancia global de un proyecto en el tiempo.
- Finalmente se ha desarrollado SEVIIA, un software que implementa el MHD-EIHA, siendo una herramienta de gran ayuda para los participantes en el

proceso de EIIA.

Tanto el modelo MH-EIIA como el software SEVIIA, han sido favorablemente empleados y avalados por el CEQA para estudios de impactos ambientales reales, lo que demuestra que hemos obtenido una solución robusta y útil para problemas de EIIA.

Como podemos observar, todos los objetivos que perseguíamos al inicio de esta investigación han sido alcanzados satisfactoriamente a través de las propuestas presentadas en esta memoria.

7.2. Trabajos Futuros

Dada la creciente complejidad de los procesos de EIIA, su trascendencia para la protección del medio ambiente y las limitaciones de los métodos tradicionales para llevar a cabo este proceso en tales contextos complejos, nuestros trabajos futuros se encaminan hacia las siguientes líneas de investigación:

- Profundizar el estudio de los problemas de EIIA para modelar otros fenómenos complejos como:
 - La interacción entre los diferentes criterios de evaluación, eliminando la presunción de independencia entre los mismos.
 - La relación entre la importancia y la magnitud como dimensiones fundamentales de los impactos ambientales, lo que permitirá proponer nuevas soluciones para EIA detalladas.
 - Auditorías Ambientales o Estudios de Impacto Ambiental ex-post, donde se analizan los efectos y resultados de un proyecto una vez ejecutado y finalizado, con el fin de identificar nuevos elementos que caracterizan las EIIA en contextos dinámicos.
 - Mejorar y extender los modelos propuestos en cuanto a:
 - La solución de problemas de EIIA en grupo donde es necesario integrar el proceso de consenso para alcanzar un alto nivel de acuerdo en entornos de toma decisión multiexperto en grupo.
-

- La flexibilidad en la elicitación de preferencias mediante la incorporación de diferentes gramáticas adaptadas a los problemas de EIIA.
- Aplicar los modelos propuestos en esta investigación a distintos problemas reales de EIIA, para comparar los resultados con otros modelos de toma de decisiones existentes en la literatura e identificar posibles adecuaciones de los modelos propuestos según los tipos de proyectos evaluados.
- Concluir el desarrollo del SEVIIA e integrar el módulo que soporte el MHD-EIIA para ofrecer una solución integral de EIIA. Además, proponer diferentes personalizaciones de acuerdo a:
 - Diferentes tipos de proyectos, debido a que existen referencias de criterios y actividades genéricas para algunos tipos de proyectos o actividades industriales.
 - Diferentes métodos de EIIA, debido a que proponen criterios, pesos y técnicas específicas de agregación de la información.

7.3. Contribuciones

Para finalizar, en relación a la difusión y publicación de los resultados presentados, destacamos las publicaciones estrechamente asociadas con esta memoria:

- En Revistas Internacionales
 - Y. Zulueta, J. Martínez, R. Bello y L. Martínez, *A discrete time variable index for supporting Dynamic Multi-Criteria Decision Making*: International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-based Systems, Volumen 22, No. 1, pp1–22, 2014.
 - Y. Zulueta, D. Rodríguez, R. Bello y L. Martínez, *A linguistic fusion approach for heterogeneous Environmental Impact Significance Assessment*: Applied Mathematical Modelling (sometido).
 - Y. Zulueta, R.M. Rodríguez, R. Bello y L. Martínez, *A hesitant heterogeneous approach for environmental impact significance assessment*: Journal of Environmental Informatics (sometido).
-

■ En Congresos Internacionales

- Y. Zulueta, J. Martínez, L. Martínez y M. Espinilla, *A discriminative index based on bipolar aggregation operators for supporting dynamic multicriteria decision making*: Aggregation Functions in Theory and in Practise, Advances in Intelligent Systems and Computing, Volumen 228, pp 237–248, Springer Berlin Heidelberg. Proceedings of the 7th International Summer School on Aggregation Operators (AGOP), España, 2013.
- Y. Zulueta y L. Martínez, *A heterogeneous approach for Environmental Impact Significance Assessment based on fuzzy linguistic models*: Proceedings of the International Conference on Machine Learning and Cybernetics (ICMLC), Volumen 4, pp 1700–1705, IEEE catalog number CFP13523–PRT, China, 2013.
- Y. Zulueta, V. Martell, J. Martínez y L. Martínez, *A dynamic multi-expert multi-criteria decision making model for risk analysis*: Advances in Artificial Intelligence and Its Applications, Lecture Notes in Computer Science, Volumen 8265, 2013, pp 132-143, Springer Berlin Heidelberg. Proceedings of the 12th Mexican International Conference on Artificial Intelligence (MICAI), México, 2013.

■ En Congresos Nacionales:

- D. Rodríguez, Y. Zulueta y L. Martínez, *Modelo lingüístico para la evaluación de la importancia del impacto ambiental*: Memorias de evento IX Convención de Medio Ambiente y Desarrollo, Simposio sobre Ciencia de la Sostenibilidad. Habana, Cuba, 2013.
- D. Rodríguez, Y. Zulueta, B. Guerra y L. Martínez, *El enfoque lingüístico difuso como herramienta de apoyo en la evaluación del impacto ambiental*: Memorias de evento Taller Oriental de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Holguín, Cuba, 2013.

Además los resultados de esta investigación fueron presentados a la convocatoria de Premios del Rector al Mérito Científico en el año 2013, de la Universidad de las Ciencias Informáticas, recibiendo el *Premio al resultado de mayor contribución a la protección del medio ambiente*.

Apéndice A

Modelado Lingüístico Difuso de Información Lingüística

El tratamiento y modelado de la incertidumbre ha sido un tema ampliamente investigado en la toma de decisiones. Por ejemplo, se han propuesto en este sentido diferentes tipos de información que pueden utilizar los expertos para proporcionar sus preferencias tales como: variables lingüísticas [90], valores intervalares [99], conjuntos difusos dudosos [190], conjuntos difusos tipo-2 [194], entre otros.

En problemas de EIIA con alto grado de incertidumbre, es habitual que los expertos utilicen información lingüística para expresar sus preferencias. Su uso ha proporcionado resultados fiables y satisfactorios en los problemas de toma de decisión [204]. Para modelar la información lingüística se han propuesto diferentes enfoques, entre ellos la Lógica Difusa [230] y el Enfoque Lingüístico Difuso [231, 232, 233]. A su vez, el uso de información lingüística implica la necesidad de realizar procesos de Computación con Palabras [19, 235] mediante modelos lingüísticos computacionales como el Modelo de Representación 2-tupla Lingüística [82], que permite obtener resultados comprensibles y cercanos al lenguaje humano. En este apéndice se revisan diferentes temas relacionados con el modelado lingüístico difuso de información lingüística, fundamentales para comprender las propuestas presentadas en esta memoria de investigación.

A.1. Lógica Difusa

La Lógica Difusa es una de las propuestas surgidas para la formalización del razonamiento aproximado, que intenta manejar el conocimiento propio del sentido común. Se trata de una generalización de la lógica booleana clásica, propuesta por Zadeh en 1965 [230] como una extensión de esta, con objeto de permitir manejar el concepto de verdades parciales situadas entre el *completamente verdadero* y el *completamente falso*, pues nuestra percepción del mundo real está invadida por conceptos que no tienen fronteras nítidamente definidas [236], como por ejemplo, alto, muchos, la mayoría, lentamente, viejo, importante, entre otros.

De acuerdo con su creador, el término Lógica Difusa tiene dos significados diferentes. En el sentido más estricto, la Lógica Difusa constituye un sistema lógico que está dedicado a la formalización de modos de razonamiento que son aproximados y no exactos. En ese sentido la Lógica Difusa es una extensión de los sistemas lógicos multivaluados, pero sus objetivos son bastante diferentes, tanto en espíritu como en esencia. En el sentido más amplio, la Lógica Difusa coexiste con la teoría de conjuntos difusos, que es una teoría de clases con fronteras no nítidas.

Un aspecto clave en la Lógica Difusa es que los conceptos son modelados mediante conjuntos difusos. A continuación, haremos una breve revisión de los conceptos básicos de la Teoría de Conjuntos Difusos.

A lo largo de más de cuatro décadas de existencia de la Teoría de Conjuntos Difusos, ha habido gran cantidad de investigaciones aplicadas en dos ramas principales [157]:

- Como una teoría matemática formal [91, 143], ampliando conceptos e ideas de otras áreas de la matemática como el álgebra, la teoría de grafos, la topología, entre otras, al aplicar conceptos de la Teoría de Conjuntos Difusos a dichas áreas.
 - Como una potente herramienta para tratar situaciones del mundo real en las que aparece incertidumbre (imprecisión, vaguedad o inconsistencia). Debido a la generalidad de esta teoría, se adapta con facilidad a diferentes contextos y problemas: teoría de sistemas [27, 155], toma de decisión [4, 13, 21], bases de datos [24, 159, 218, 219, 228], recuperación de información [22, 23, 88, 109, 127, 142], evaluación sensorial [41, 130, 131, 134] y en la propia evaluación
-

de impactos ambientales [2, 15, 67, 124, 175].

En muchas ocasiones esto implica adaptar los conceptos originales de la Teoría de Conjuntos Difusos a diferentes contextos en los que se esté trabajando. En los siguientes apartados, hacemos una breve descripción de los conceptos básicos relacionados con la Teoría de Conjuntos Difusos que utilizaremos en nuestra memoria de investigación.

A.1.1. Conjuntos Difusos y Funciones de Pertenencia

La noción de conjunto difuso refleja la idea de agrupar colecciones de objetos que cumplen una o varias propiedades que caracterizan a dicho conjunto, en los que la transición de la pertenencia a la no pertenencia es gradual y no abrupta. Los conjuntos introducen una noción fundamental de dicotomía. En esencia, cualquier proceso de dicotomización es una clasificación binaria: aceptar o rechazar que un objeto pertenezca a una categoría determinada. Normalmente, la decisión de aceptar se denota por 1 y la de rechazar por 0. Por tanto, una decisión de clasificación puede expresarse a través de una función característica.

Definición 11 Sea A un conjunto en el universo X , la función característica asociada a A , $A(x)$, $x \in X$, se define como:

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

La Lógica Difusa se fundamenta en el concepto de conjunto difuso [230], que refleja el requerimiento anterior y admite valores intermedios en la función característica, y que se denomina función de pertenencia.

La función $A : X \rightarrow \{0, 1\}$ tiene una restricción con un límite bien definido sobre los objetos del universo X que pueden ser asignados al conjunto A . El concepto de conjunto difuso suaviza este requerimiento y admite valores intermedios en la función característica, que pasa a denominarse función de pertenencia. Esto permite una interpretación más realista de las categorías que describen los objetos del mundo real que no tienen unos límites claros y bien definidos, como por ejemplo, *buen sabor*, *persona joven*, *coche potente* o *vestido cómodo*. Si un objeto pertenece a una categoría con un grado que puede ser expresado mediante un número real en el intervalo $[0, 1]$, cuanto más cercano a 1 sea el grado, mayor

será el grado de pertenencia a la categoría determinada, y cuanto más cercano a 0, menor será el grado de pertenencia a dicha categoría. Por tanto, un conjunto difuso puede definirse como una colección de objetos con valores de pertenencia entre 0 y 1. 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 de la siguiente forma.

Definición 12 *Un conjunto difuso $\tilde{A}$ sobre X está caracterizado por una función de pertenencia que transforma los elementos de un dominio o universo del discurso X en el intervalo $[0, 1]$.*

$$\mu_{\tilde{A}} : X \longrightarrow [0, 1]$$

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

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

Por tanto, podemos observar que un conjunto difuso es una generalización del concepto de conjunto clásico cuya función de pertenencia toma sólo dos valores $\{0, 1\}$.

Definición 13 *El soporte de un conjunto difuso $\tilde{A}$, $\text{Soporte}(\tilde{A})$, es el conjunto de todos los elementos de $x \in X$, tales que, el grado de pertenencia sea mayor que cero:*

$$\text{Soporte}(\tilde{A}) = \{x \in X \mid \mu_{\tilde{A}}(x) > 0\}$$

Definición 14 *El núcleo de un conjunto difuso $\tilde{A}$, $\text{Núcleo}(\tilde{A})$, es el conjunto de todos los elementos de $x \in X$, tales que, el grado de pertenencia es igual a 1:*

$$\text{Núcleo}(\tilde{A}) = \{x \in X \mid \mu_{\tilde{A}}(x) = 1\}$$

En muchas ocasiones puede ser interesante conocer no sólo 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 determinado umbral α . Estos conjuntos se denominan α -cortes.

Definición 15 Sea $\tilde{A}$ un conjunto difuso sobre el universo X . Dado un número $\alpha \in [0, 1]$, se define el α -corte sobre $\tilde{A}$, ${}^\alpha A$, como un conjunto clásico que contiene todos los valores del universo X cuya función de pertenencia en $\tilde{A}$ sea mayor o igual al valor α :

$${}^\alpha A = \{x \in X \mid \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha\}$$

A.1.2. Tipos de Funciones de Pertenencia

Los conjuntos difusos pueden ser definidos sobre universos finitos o infinitos usando distintas notaciones. Si un universo X es discreto y finito, con cardinalidad n , el conjunto difuso puede expresarse con un vector n -dimensional cuyos valores son los grados de pertenencia de los correspondientes elementos de X .

La función de pertenencia no es una función trivial como en los conjuntos clásicos, por lo que hay que definirla. En principio, cualquier forma de la función $\mu_{\tilde{A}} : X \rightarrow [0, 1]$, describe una función de pertenencia asociada a un conjunto difuso $\tilde{A}$ que depende no sólo del concepto que representa, sino también del contexto en el que se usa. Estas funciones pueden tener diferentes propiedades y representaciones gráficas, como las que se muestran en la Figura A.1.

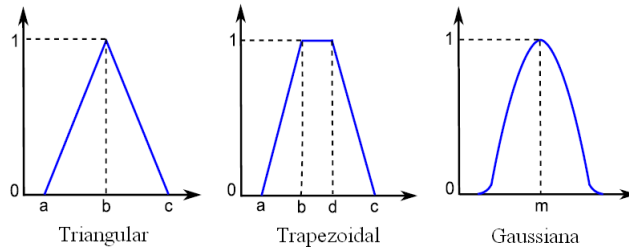


Figura A.1: Representación gráfica de funciones de pertenencia

A veces, la semántica de los conjuntos difusos no es muy sensible a variaciones en la forma, y es conveniente el uso de funciones simples. Los conjuntos difusos suelen representarse con familias de funciones paramétricas. Las más comunes son las siguientes:

1. Función Triangular

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

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

2. Función Trapezoidal

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

donde b y d indican el intervalo donde la función de pertenencia vale 1.

3. Función Gaussiana

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

donde $k > 0$.

A.2. El Enfoque Lingüístico Difuso

El uso del modelado lingüístico y por tanto de procesos de Computación con Palabras es adecuado cuando la información disponible es demasiado imprecisa para justificar el uso de valores numéricos o cuando la imprecisión de la información puede ser aprovechada para alcanzar robustez, solución a bajo coste y una buena interpretación de la realidad.

A pesar de que en la literatura existen diferentes enfoques para modelar la información lingüística [114, 118, 137, 138, 206, 231, 232, 233] a continuación se revisa el Enfoque Lingüístico Difuso [231, 232, 233] debido a su importancia para nuestra investigación y su aplicabilidad en problemas de decisión donde los expertos utilizan valoraciones lingüísticas [18, 57, 82, 189, 206].

La base teórica del Enfoque Lingüístico Difuso es la Teoría de los Conjuntos Difusos [230]. Este enfoque proporciona una representación directa de los aspectos de naturaleza cualitativa mediante variables lingüísticas [81]. Una variable lingüística se caracteriza por un valor sintáctico o etiqueta y por un valor semántico o significado. La etiqueta es una palabra que pertenece a un CTL y el significado de dicha etiqueta viene dado por un subconjunto difuso en un universo del discurso. Dado que las palabras son menos precisas que los números, el concepto de variable lingüística parece ser adecuado para caracterizar objetos que son demasiado complejos o no están completamente definidos para poder ser evaluados mediante valores numéricos precisos. Una variable lingüística en el Enfoque Lingüístico Difuso es definida como sigue:

Definición 16 [81]. *Una variable lingüística se caracteriza por una quintupla $(H, T(H), U, G, M)$, donde:*

- *H es el nombre de la variable;*
- *$T(H)$ (o sólo T) simboliza el conjunto de términos de H , es decir, el conjunto de nombres de valores lingüísticos de H ;*
- *U es el universo del discurso;*
- *G es una regla sintáctica (que normalmente toma forma de gramática) para generar los nombres de los valores de H ; y*
- *M es una regla semántica para asociar significado $M(X)$, a cada elemento de H , el cual es un conjunto difuso de U .*

La resolución de un problema bajo la perspectiva del Enfoque Lingüístico Difuso, se desarrolla siguiendo dos operaciones básicas y fundamentales:

1. Elección de un adecuado CTL, $T(H)$.
2. Definición de la semántica asociada a cada término lingüístico.

Ambas operaciones se describen a continuación.

A.2.1. Elección del CTL

El objetivo de establecer los descriptores lingüísticos de una variable lingüística, es proporcionar a una fuente de información un número adecuado de términos con los cuáles se pueda expresar con facilidad su información y/o conocimiento. Para alcanzar este objetivo hay que analizar un aspecto muy importante, tal y como es, la granularidad de la incertidumbre [19], esto es, la cardinalidad del CTL usado para expresar la información. Se dice que un CTL tiene:

- Una granularidad baja o un tamaño de grano grueso cuando la cardinalidad del CTL es pequeña. Esto significa que el dominio está poco particionado 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 CTL es alto. Esta granularidad es adecuada cuando el conocimiento de los expertos sobre la variable a valorar es alto. Sin embargo, cuando los expertos tienen un grado de conocimiento bajo, este tipo de granularidad puede resultar complejo, ya que los expertos no serían capaces de discriminar y seleccionar qué etiqueta representa mejor su valoración.

La cardinalidad de un CTL 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 para permitir hacer una discriminación de las valoraciones en un número limitado de grados. Valores típicos de cardinalidad usados en modelos lingüísticos son valores impares, tales como 7 ó 9, donde el término medio representa una valoración de aproximadamente 0.5. El resto de los términos se distribuyen alrededor de éste [19]. Estos valores clásicos de cardinalidad parecen estar dentro de la línea de observación de Miller [141] sobre la capacidad humana en la que se indica que se pueden manejar razonablemente y recordar alrededor de siete o nueve términos diferentes.

Existen distintas posibilidades para elegir los descriptores lingüísticos apropiados del conjunto de términos y su semántica [18, 23, 214]: A continuación, analizamos brevemente los dos mecanismos más ampliamente utilizados.

- **Enfoque Basado en una Gramática Libre de Contexto**
-

Una posibilidad para generar el CTL consiste en utilizar una gramática libre de contexto G , donde el conjunto de términos pertenece al lenguaje generado por G [18, 23, 231, 232, 233, 234]. Una gramática generadora, G , es una 4-tupla $(VN; VT; I; P)$, siendo VN el conjunto de símbolos no terminales, VT el conjunto de símbolos terminales, I el símbolo inicial y P el conjunto de reglas de producción. La elección de estos cuatro elementos determinará la cardinalidad y forma del CTL. El lenguaje generado debería ser lo suficientemente grande para que pueda describir cualquier posible situación del problema. De acuerdo con las observaciones de Miller [141], el lenguaje generado no tiene que ser infinito, sino más bien fácilmente comprensible. Por ejemplo, entre los símbolos terminales y no terminales de G podemos encontrar términos primarios (por ejemplo: *alto*, *medio*, *bajo*), modificadores (por ejemplo: *no*, *mucho*, *muy*, *más o menos*), relaciones (por ejemplo: *mayor que*, *menor que*) y conectivos (por ejemplo: *y*, *o*, *pero*). Construyendo I como cualquier término primario, el CTL $T(H) = \{muy\ alto, alto, alto\ o\ medio, \dots\}$ se genera usando P .

■ **Enfoque Basado en Términos Primarios con una Estructura Ordenada**

Una alternativa para reducir la complejidad de definir una gramática consiste en dar directamente un conjunto de términos distribuidos sobre una escala con un orden total definido [21, 80, 214]. En estos casos, es necesario que el CTL satisfaga las siguientes condiciones adicionales [213]:

1. Existe un operador de negación. Por ejemplo, $Neg(s_i) = s_j$, $j = g - i$, siendo $g + 1$ la cardinalidad de $T(H)$.
2. Tiene un operador de maximización: $max(s_i, s_j) = s_i$ si $s_i \succeq s_j$.
3. Tiene un operador de minimización: $min(s_i, s_j) = s_i$ si $s_i \preceq s_j$.

En esta memoria de investigación, se utiliza el enfoque basado en términos primarios con una estructura ordenada.

A.2.2. Definición de la Semántica del CTL

En la literatura existen varios enfoques para definir la semántica del conjunto de etiquetas lingüísticas [13, 187], siendo uno de los más utilizados el enfoque ba-

sado en funciones de pertenencia [12, 42, 185]. Este enfoque define la semántica del CTL utilizando números difusos en el intervalo $[0, 1]$ donde cada número difuso es descrito mediante una función de pertenencia. 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 [11, 42, 45, 46, 47]. Debido a que las valoraciones lingüísticas dadas por las fuentes de información son aproximaciones, algunos autores consideran que las funciones de pertenencia paramétricas trapezoidales son lo suficientemente buenas para representar la vaguedad de dichas valoraciones lingüísticas [45, 46, 47]. Esta representación paramétrica se expresa usando una 4-tupla (a, b, d, c) . Los parámetros b y d indican el intervalo en el que la función de pertenencia vale 1; mientras que a y c indican los extremos izquierdo y derecho de la función de pertenencia [11]. En la Figura A.2 se muestra la semántica de una variable lingüística que evalúa la altura de una persona, utilizando números difusos definidos por funciones de pertenencia trapezoidales.

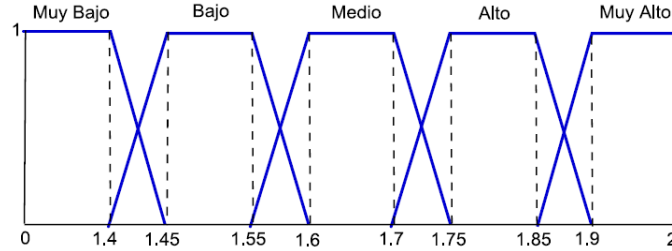


Figura A.2: Definición semántica de la variable lingüística altura utilizando funciones trapezoidales

Un caso particular de este tipo de funciones de pertenencia son las funciones de pertenencia triangulares, en las que $b = d$, por lo que se representan mediante una 3-tupla (a, b, c) , donde b es el valor donde la función de pertenencia vale 1, mientras que a y c indican los extremos izquierdo y derecho de la función. La Figura A.3 muestra el mismo conjunto anterior pero representado con funciones de pertenencia triangulares.

Otros autores utilizan otros tipos de funciones de pertenencia como por ejemplo, las funciones Gaussianas [14, 119, 145]. Este enfoque implica establecer las funciones de pertenencia asociadas a cada etiqueta lo cual implica la dificultad

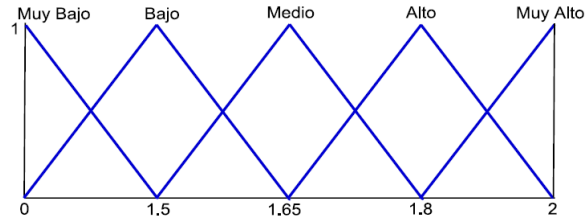


Figura A.3: Definición semántica de la variable lingüística altura utilizando funciones triangulares

para 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 *muy alto* pueden verse en la Figura A.4.

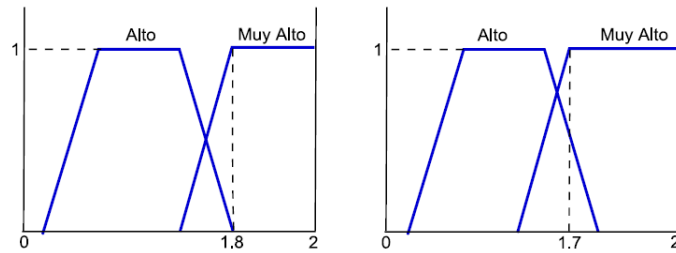


Figura A.4: Diferentes semánticas para el concepto *muy alto*

Por tanto, pueden darse situaciones de términos lingüísticos con una sintaxis similar y diferente semántica [81]. Además, no siempre es posible para las fuentes de información definir un conjunto difuso para cada etiqueta, porque requiere un exceso de precisión que la fuente de información no es capaz de proporcionar. Por ello, en muchas ocasiones se consideran entornos donde las fuentes de información pueden discriminar sin problemas el mismo CTL bajo una concepción parecida, teniendo en cuenta que el concepto de variable lingüística sirve para expresar una medida de una caracterización aproximada de información para una preferencia imprecisa.

A.3. Computación con Palabras

El uso de información lingüística implica la necesidad de realizar procesos de Computación con Palabras [19, 235], es decir, el uso de técnicas computacionales que tienen definidas diferentes operaciones tales como, agregación, negación y comparación, sobre información lingüística.

La Computación con Palabras persigue tres objetivos fundamentales. En primer lugar, ofrecer una metodología para calcular y razonar cuando la información disponible no es suficientemente precisa como para justificar el empleo de números. En segundo lugar, aprovechar la tolerancia de la imprecisión para alcanzar manejabilidad, robustez, bajo coste y mejor relación con la realidad. Y, en tercer lugar, proporcionar bases para el desarrollo de lenguajes de programación que pudieran aproximarse a los lenguajes naturales en apariencia y en capacidad de expresión [236].

La Computación con Palabras [237] es una metodología de razonamiento, computación y toma de decisiones en la que se utilizan palabras procedentes del lenguaje natural. Ha sido aplicada como base computacional en toma de decisiones lingüística [78, 133], ya que proporciona herramientas cercanas a los procesos de razonamiento de los seres humanos relacionados con la toma de decisiones. Pero no sólo se ha aplicado en toma de decisiones, sino también en otros campos como aprendizaje [8], clasificación [97], bases de datos [103, 219], entre otros.

En la literatura se han propuesto diferentes esquemas de Computación con Palabras. Tong y Bonissone presentaron en [187] una técnica para toma de decisiones lingüística en la que se asumía que el uso de etiquetas lingüísticas con semántica difusa era adecuada para tratar la incertidumbre propia de estos problemas. También se asumía que los resultados para tomar una decisión, debían ser cuantificables en lenguaje natural, como se muestra en la Figura A.5.

De forma similar Schmucker [172] y principalmente Yager [216, 221], propusieron esquemas lingüísticos para manejar la incertidumbre, como se muestra en la Figura A.6. Yager [216, 221] señala la importancia de las fases de transformación y retransformación en los procesos de Computación con Palabras. El primero implica transformar la información lingüística en un formato manipulable por las máquinas basado en herramientas difusas, y el segundo, consiste en convertir los resultados computacionales en información lingüística para facilitar su compren-

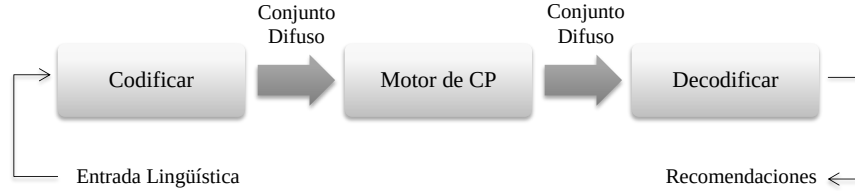


Figura A.5: Esquema de Computación con Palabras basado en la computación con percepciones

sión a los seres humanos, siendo éste el principal objetivo en la Computación con Palabras.



Figura A.6: Esquema de Computación con Palabras basado en los procesos de transformación, manipulación y retransformación

A.4. Modelo Lingüístico de Representación 2-tupla

El modelo simbólico 2-tupla fue introducido por Herrera y Martínez en [82] con el objetivo de mejorar la precisión de los resultados y facilitar los procesos de Computación con Palabras tratando el dominio lingüístico como un dominio continuo pero manteniendo la base lingüística (sintaxis y semántica). Para ello, este modelo extiende la representación lingüística difusa añadiendo un nuevo parámetro.

El modelado de la información lingüística está basado en el concepto de *traslación simbólica* y lo utiliza para representar la información lingüística mediante un par de valores, llamados 2-tupla lingüística (s_i, α) , donde $s_i \in S = \{s_0, \dots, s_g\}$ es un término lingüístico y α es un valor numérico representando la traslación simbólica.

Definición 17 Sea $S = \{s_0, \dots, s_g\}$ un CTL y $\beta \in [0, g]$ el resultado de una ope-

ración de agregación simbólica. La traslación simbólica de un término lingüístico $s_i \in S = \{s_0, \dots, s_g\}$ es un valor numérico definido en $[-0.5, 0.5)$ que representa la diferencia de información entre una cantidad de información $\beta \in [0, g]$ obtenida de una operación simbólica y el índice del término lingüístico más cercano.

Este modelo de representación define un conjunto de funciones para realizar transformaciones entre valores numéricos y 2-tupla lingüística con objeto de facilitar los procesos de Computación con Palabras [82].

Definición 18 Sea $S = \{s_0, \dots, s_g\}$ un CTL. La 2-tupla asociada a β es obtenida mediante la función $\Delta : [0, g] \rightarrow \tilde{S} = S \times [-0.5, 0.5)$ definida como:

$$\Delta(\beta) = \begin{cases} s_i, & i = \text{round}(\beta) \\ \alpha = \beta - i, & \alpha \in [-0.5, 0.5) \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

donde round es el operador de redondeo, s_i es la etiqueta con índice más cercano a β y α es el valor de la traslación simbólica.

Debemos tener en cuenta que Δ es biyectiva y $\Delta^{-1} : \tilde{S} \rightarrow [0, g]$ es definida mediante $\Delta^{-1}(s_i, \alpha) = i + \alpha$.

De esta forma la 2-tupla en $\tilde{S}$ es identificada con el valor numérico en el intervalo $[0, g]$. La conversión de un término lingüístico en un valor 2-tupla lingüístico consiste en añadir un valor 0 como traslación simbólica:

$$s_i \in S \implies (s_i, 0) \in \tilde{S}$$

Junto a este modelo de representación de información lingüística, Herrera y Martínez definieron un modelo computacional lingüístico basado en las funciones de transformación Δ y Δ^{-1} . En [82] se definieron los operadores de comparación, negación y varios operadores de agregación para 2-tuplas que revisamos a continuación.

- Comparación de 2-Tuplas

La comparación de información lingüística representada mediante 2-tuplas se realiza según un orden lexicográfico.

Sean (s_k, α_1) and (s_l, α_2) dos 2-tuplas, cada una representando una cantidad de información, entonces:

- si $k < l$ entonces $(s_k, \alpha_1) \prec (s_l, \alpha_2)$
- si $k = l$ entonces
 - si $\alpha_1 = \alpha_2$ entonces $(s_k, \alpha_1) = (s_l, \alpha_2)$;
 - si $\alpha_1 < \alpha_2$ entonces $(s_k, \alpha_1) \prec (s_l, \alpha_2)$;
 - si $\alpha_1 > \alpha_2$ entonces $(s_k, \alpha_1) \succ (s_l, \alpha_2)$.

■ Operador Negación:

$$Neg(s_i) = s_j \quad \text{tal que} \quad j = g - i. \quad (\text{A.2})$$

■ Agregación de 2-tuplas:

Como se ha indicado, la agregación consiste en obtener un valor colectivo que exprese la información de un conjunto de valores marginales y el resultado debe ser consistente con la representación de los valores de entrada, por tanto, el resultado de la agregación de 2-tuplas debe ser una 2-tupla.

En el contexto de la agregación de información, las funciones Δ^{-1} y Δ transforman valores numéricos en 2-tuplas y viceversa sin pérdida de información por lo que los operadores de agregación numéricos tradicionales pueden extenderse a 2-tuplas de forma intuitiva y fácil. En la literatura podemos encontrar diferentes operadores de agregación que obtienen un valor lingüístico 2-tupla a partir de un conjunto de valoraciones lingüísticas en 2-tupla [121, 139, 158, 197, 200, 201, 226, 239]. A continuación revisaremos los que son de mayor interés para esta memoria de investigación.

• Media Aritmética Extendida

Este operador simboliza el concepto intuitivo de punto de equilibrio o centro del conjunto de valores. La extensión de este operador para información lingüística representada mediante 2-tupla se obtiene mediante la siguiente definición:

Definición 19 [82] Sea $x = \{(s_1, \alpha_1), \dots, (s_m, \alpha_m)\}$ un conjunto de 2-tuplas, la media aritmética extendida para 2-tupla $\Phi : \tilde{S}^m \rightarrow \tilde{S}$ se define como:

$$\Phi(x) = \Delta \left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \Delta^{-1}((s_i, \alpha_i)) \right) \quad (\text{A.3})$$

- Media Ponderada Extendida

La media ponderada permite que diferentes valores tengan diferente importancia. Esto se realiza asignando a cada valor un peso asociado que indica cuál es la importancia de ese valor.

Definición 20 [82] Sea $x = \{(s_1, \alpha_1), \dots, (s_m, \alpha_m)\}$ un conjunto de 2-tuplas y $W = (w_1, \dots, w_m)$ un vector numérico con los pesos asociados a cada una de las 2-tuplas, la media ponderada extendida para 2-tupla $\Psi : \tilde{S}^m \rightarrow \tilde{S}$, se define como:

$$\Psi(x) = \Delta \left(\frac{\sum_{i=1}^m w_i \Delta^{-1}((s_i, \alpha_i))}{\sum_{i=1}^m w_i} \right) \quad (\text{A.4})$$

A.5. Construcción de una Jerarquía Lingüística

En los procesos de evaluación, es común que los expertos o evaluadores implicados, tengan diferente grado de conocimiento sobre los elementos evaluados. En estos casos es importante ofrecer un marco flexible de evaluación donde los expertos puedan expresar sus preferencias en conjuntos de términos lingüísticos distintos. Con este objetivo, Herrera et al. definieron en [85] un contexto lingüístico multi-granular modelado mediante jerarquías lingüísticas para mejorar la precisión de los procesos de Computación con Palabras.

Una jerarquía lingüística es un conjunto de niveles, donde cada nivel es un conjunto de términos lingüísticos con una granularidad diferente del resto de niveles de la jerarquía lingüística [50].

El enfoque de Herrera et al. [85] para manejar la información lingüística multi-granular de un modo simbólico y preciso está basado en el modelo de representación lingüístico con 2-tuplas. Cada nivel de una jerarquía lingüística se nota como $l(t, n(t))$, siendo t un número que indica el nivel de la jerarquía y $n(t)$ la granularidad del conjunto de términos lingüísticos del nivel t . Los niveles de una jerarquía lingüística están ordenados en función de su granularidad, es decir, que para dos niveles consecutivos t y $t + 1$, $n(t + 1) > n(t)$. Por lo tanto, cada nivel $t + 1$ proporciona un refinamiento lingüístico con respecto al nivel anterior t . Las jerarquías lingüísticas trabajan con términos lingüísticos cuyas funciones de pertenencia son triangulares, simétricas y uniformemente distribuidas en el inter-

valo $[0, 1]$. Además, los conjuntos de términos lingüísticos tienen una granularidad impar, indicando la etiqueta central un valor de indiferencia.

Formalmente, una jerarquía lingüística, LH , se define como la unión de todos los niveles t que la conforman:

$$LH = \bigcup_t l(t, n(t))$$

Para su construcción, no debemos obviar que el orden jerárquico viene dado por el incremento de granularidad de los conjuntos de términos lingüísticos de cada nivel. Partiendo de que $S^{n(t)} = \{s_0^{n(t)}, \dots, s_{n(t)-1}^{n(t)}\}$ sea el conjunto de términos lingüísticos definido para el nivel t con $n(t)$ términos, la construcción de una jerarquía lingüística debe satisfacer las siguientes reglas básicas [85]:

Regla 1. Preservar todos los puntos modales previos de las funciones de pertenencia de cada uno de los términos lingüísticos de cada nivel con respecto a los del nivel siguiente.

Regla 2. Realizar las transiciones entre dos niveles consecutivos suaves. El propósito es construir un nuevo conjunto de términos lingüísticos, $S^{n(t+1)}$, de forma que añadiremos un nuevo término lingüístico entre cada pareja de términos pertenecientes al conjunto de términos del nivel anterior t . Para realizar esta inserción de nuevos términos, reduciremos el soporte de las etiquetas lingüísticas para dejar hueco entre ellas para la nueva etiqueta.

De forma genérica, podemos establecer que la granularidad del conjunto de términos lingüísticos del nivel $t + 1$, $S^{n(t+1)}$, puede obtenerse a partir del nivel anterior t , $S^{n(t)}$, de la siguiente manera :

$$l(t, n(t)) \rightarrow l(t + 1, 2 \cdot n(t) - 1)$$

Tabla A.1: Ejemplos de jerarquías lingüísticas de dos niveles

	$l(t, n(t))$	$l(t, n(t))$	$l(t, n(t))$	$l(t, n(t))$
1	$l(1, 3)$	$l(1, 5)$	$l(1, 7)$	$l(1, 9)$
2	$l(2, 5)$	$l(2, 9)$	$l(2, 13)$	$l(2, 17)$

Como se ha indicado anteriormente, la granularidad de una jerarquía lingüística viene determinada por el primer nivel. Si definimos de primer nivel $l(1,3)$, los siguientes niveles son $l(2,5)$, $l(3,9)$, etc. La Tabla A.1 y Figura A.7 muestran ejemplos de jerarquías lingüísticas de 2 niveles debido a que en esta memoria se presta especial atención a jerarquías de este tipo.

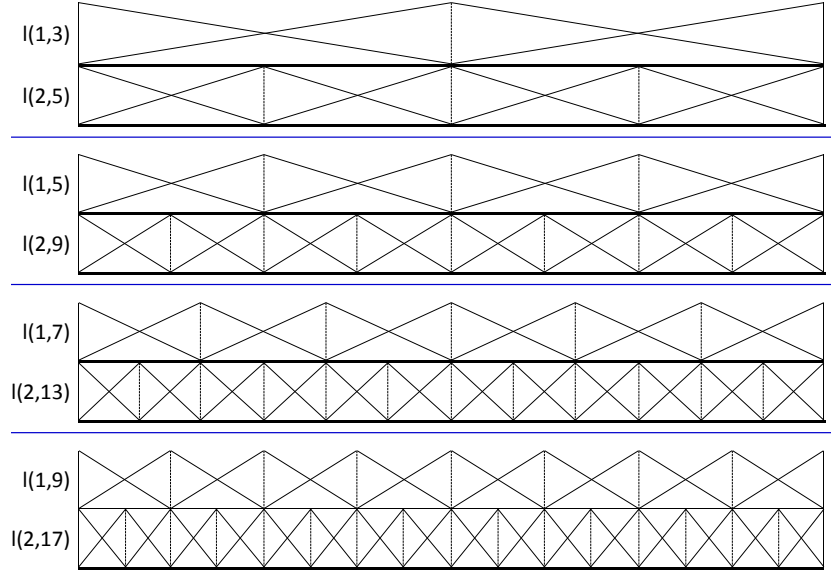


Figura A.7: Ejemplos de jerarquías lingüísticas de dos niveles

A.6. Modelado de Información en Contextos Dudosos

Normalmente la complejidad que aparece en los problemas de toma de decisiones y especialmente en la EIHA, se debe a la incertidumbre relacionada con las alternativas y el conocimiento de los expertos. Para mejorar la flexibilidad de la elicitación de la información en problemas de toma de decisiones bajo alto grado de incertidumbre, se han propuesto los CDD [190] y los CTLDD [162], que permiten expresar a los expertos sus preferencias con más de un valor, numérico o lingüístico respectivamente, en aquellas situaciones de decisión donde el uso de un único valor no representa adecuadamente las dudas en el conocimiento. A continuación se revisan ambos conceptos.

A.6.1. Conjuntos Difusos Dudosos

Para manejar la incertidumbre provocada por la duda en contextos cuantitativos donde los expertos pueden dudar entre varios valores para establecer el grado de pertenencia de un elemento a un conjunto difuso, Torra introdujo el concepto de CDD [190] como una extensión de los conjuntos difusos.

Definición 21 [190] Sea X un conjunto de referencia, un CDD sobre X es una función h que devuelve un subconjunto de valores en $[0, 1]$:

$$h : X \rightarrow P([0, 1])$$

Para un conjunto de referencia X , Torra definió además:

- Conjunto vacío: $h(x) = \{0\} \forall x \in X$.
- Conjunto completo: $h(x) = \{1\} \forall x \in X$.
- Completa ignorancia para $x \in X$: $h(x) = [0, 1]$.

Un CDD puede ser además construido a partir de la unión de sus funciones de pertenencia, como se indica a continuación.

Definición 22 [190] Sea $M = \{\mu_1, \dots, \mu_n\}$ un conjunto de n funciones de pertenencia. El CDD h_M , es definido como:

$$h_M : X \rightarrow P([0, 1])$$

$$h_M(x) = \bigcup_{\mu \in M} \mu(x)$$

Además, Xia y Xu [203] completaron la definición original de CDD con la siguiente representación matemática:

$$E = \{\langle x, h_E(x) \rangle : x \in X\},$$

donde $h_E(x)$ es un conjunto de valores en $[0, 1]$ que denotan los posibles grados de pertenencia de un elemento $x \in X$ a un conjunto E . Por conveniencia, Xia y Xu denotaron $h = h_E(x)$ y lo llamaron Elemento Difuso Dudosos (EDD) de E y $H = \cup h_E(x)$, el conjunto de todos los EDD de E .

Por lo tanto, un CDD es un conjunto (finito) de subconjuntos en el intervalo $[0, 1]$, un conjunto para cada elemento del conjunto de referencia X y un EDD en uno de estos conjuntos.

Torra originalmente [190] propuso algunas operaciones básicas para los EDD (aunque no los haya llamado CDD).

Definición 23 [190] Sea h un CDD, sus límites superior e inferior son:

$$h^- = \min\{\gamma | \gamma \in h\}$$

$$h^+ = \max\{\gamma | \gamma \in h\}$$

La envoltura de un CDD puede ser representada por un conjunto difuso intuicionista.

Definición 24 [190] Sea h un CDD, el conjunto difuso intuicionista $A_{env(h)}$, es definido como la envoltura de h donde $A_{env(h)}$ es

$$A_{env}(h) = (h^-, 1 - h^+) \quad (\text{A.5})$$

A.6.2. Conjuntos de Términos Lingüísticos Difusos Dudosos

De manera similar al tratamiento de situaciones dudosas mediante CDD, pero en entornos cualitativos, puede ocurrir que los expertos duden entre varios términos lingüísticos al momento de emitir una valoración. Para modelar estas situaciones Rodríguez et al. [162] proponen el concepto de CTLDD que está basado en el Enfoque Lingüístico Difuso [231, 232, 233] y extiende el concepto de CDD al contexto lingüístico.

Definición 25 [162] Sea $S = \{s_0, \dots, s_g\}$ un CTL, un CTLDD H_S , es definido como un subconjunto finito y ordenado de términos lingüísticos consecutivos de S :

$$H_S = \{s_i, s_{i+1}, \dots, s_j\} \quad \text{tal que } s_k \in S, \quad k \in \{i, \dots, j\}$$

Dos operadores permiten obtener los límites superior e inferior de un CTLDD.

Definición 26 [162] El límite superior H_S^+ , y el límite inferior H_S^- , de el CTLDD H_S , son definidos como:

$$H_{S^+} = \max(s_i) = s_j, \quad s_i \in H_S \text{ y } s_i \leq s_j \quad \forall i$$

$$H_{S^-} = \min(s_i) = s_j, \quad s_i \in H_S \text{ y } s_i \geq s_j \quad \forall i$$

Para llevar a cabo procesos de Computación con Palabras, la envoltura de un CTLDD se define como un intervalo lingüístico.

Definición 27 [162] *La envoltura de un CTLDD $env(H_S)$, es un intervalo lingüístico cuyos límites se obtienen mediante límite superior (max) y límite inferior (min):*

$$env(H_S) = [H_{S-}, H_{S+}], \quad H_{S-} \leq H_{S+}$$

En problemas reales, los expertos comúnmente emplean expresiones lingüísticas para emitir sus valoraciones, en lugar de múltiples términos lingüísticos. Por lo tanto, para mejorar la elicitación de información lingüística, Rodríguez et al. [162] propusieron el uso de gramáticas libres de contexto para generar expresiones cercanas al razonamiento y lenguaje humanos. Una gramática libre de contexto G_H , fue definida para generar expresiones lingüísticas comparativas similares a las utilizadas por los expertos en problemas de toma de decisión.

Definición 28 [162] *Sea G_H una gramática libre de contexto y $S = \{s_0, \dots, s_g\}$ un CTL, los elementos de $G_H = (V_N, V_T, I, P)$ son definidos como sigue:*

$$\begin{aligned} V_N &= \{ \langle \text{term primario} \rangle, \langle \text{term compuesto} \rangle, \langle \text{relación unaria} \rangle, \\ &\quad \langle \text{relación binaria} \rangle, \langle \text{conjunción} \rangle \}, \\ V_T &= \{ \text{mayor que}, \text{menor que}, \text{al menos}, \text{como mucho}, \text{entre}, y, s_0, \dots, s_g \}, \\ I &\in V_N. \\ P &= \{ I ::= \langle \text{term primario} \rangle | \langle \text{term compuesto} \rangle \\ &\quad \langle \text{term compuesto} \rangle ::= \langle \text{relación unaria} \rangle \langle \text{term primario} \rangle | \\ &\quad \langle \text{relación binaria} \rangle \langle \text{term primario} \rangle \langle \text{conjunción} \rangle \langle \text{term primario} \rangle \\ &\quad \langle \text{term primario} \rangle ::= s_0 | s_1 | \dots | s_g \\ &\quad \langle \text{relación unaria} \rangle ::= \text{mayor que} | \text{menor que} | \text{al menos} | \text{como mucho} \\ &\quad \langle \text{relación binaria} \rangle ::= \text{entre} \\ &\quad \langle \text{conjunción} \rangle ::= y \} \end{aligned}$$

Las expresiones lingüísticas comparativas anteriores pueden ser representadas a través de un CTLDD aplicando una función de transformación E_{G_H} [162] que convierte las expresiones lingüísticas comparativas en CTLDD.

Definición 29 [162] *Sea E_{G_H} una función que transforma las expresiones lingüísticas comparativas ll obtenidas mediante la gramática libre de contexto G_H , en*

CTLDD H_S , donde S es el conjunto de términos lingüísticos utilizado por G_H , y S_{ll} es el conjunto de expresiones lingüísticas generadas mediante G_H .

$$E_{G_H} : S_{ll} \longrightarrow H_S$$

La transformación de las expresiones lingüísticas comparativas en CTLDD dependerá de las expresiones que genere la gramática libre de contexto G_H . A continuación se revisan las transformaciones de las expresiones generadas por la gramática libre de contexto básica G_H de la Definición 28.

- $E_{G_H}(s_i) = \{s_i/s_i \in S\}$
- $E_{G_H}(\text{menor que } s_i) = \{s_j/s_j \in S \text{ y } s_j < s_i\}$
- $E_{G_H}(\text{mayor que } s_i) = \{s_j/s_j \in S \text{ y } s_j > s_i\}$
- $E_{G_H}(\text{al menos } s_i) = \{s_j/s_j \in S \text{ y } s_j \geq s_i\}$
- $E_{G_H}(\text{como mucho } s_i) = \{s_j/s_j \in S \text{ y } s_j \leq s_i\}$
- $E_{G_H}(\text{entre } s_i \text{ y } s_j) = \{s_k/s_k \in S \text{ y } s_i \leq s_k \leq s_j\}$

Con la función de transformación E_{G_H} , es fácil comprender la representación de las expresiones lingüísticas comparativas S_{ll} en CTLDD. La Figura A.8 muestra algunos ejemplos de la representación gráfica de diferentes expresiones lingüísticas comparativas.

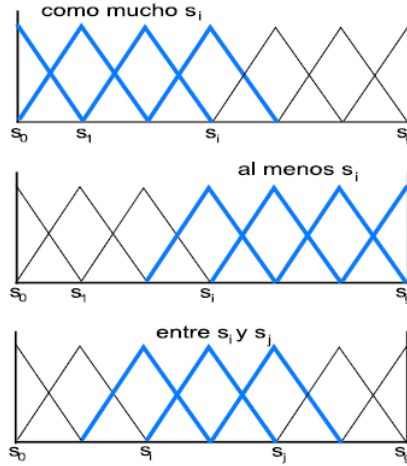


Figura A.8: Expresiones lingüísticas comparativas representadas mediante CTLDD

Apéndice B

Operadores de Agregación

La agregación de información de manera eficiente y flexible se ha convertido en uno de los principales temas de investigación para la resolución de problemas de decisión, puesto que precisan procesar una elevada cantidad de información variada tanto en calidad como en precisión.

No es nuestra intención mostrar una relación exhaustiva de los operadores que actualmente existen en la literatura [10, 64], sino que nuestro objetivo es revisar en este apéndice algunos operadores comúnmente utilizados en la toma de decisiones y algunas de las propiedades que manifiestan [35, 107] y que son utilizadas en esta memoria de investigación.

B.1. Agregación de información

La selección del operador de agregación apropiado para la solución de cada problema puede apoyarse en los siguientes criterios:

- **Fuerza axiomática:** Un operador se considera más adecuado que otro si está menos limitado por los axiomas que debe satisfacer.
- **Ajuste empírico:** Los operadores deben ajustarse a la realidad y al contexto del problema lo que hace más adecuado determinados operadores según el problema que se intente solucionar. La realización de pruebas empíricas, especialmente tomando valores conflictivos, suele ser ventajosa para seleccionar un operador.

- **Adaptabilidad:** Los operadores deben poder adaptarse al contexto cambiante en el que se encuentran, principalmente mediante la parametrización.
- **Eficiencia numérica:** El esfuerzo computacional de cálculo necesario es importante a la hora de resolver problemas grandes y puede ser un factor clave para elegir un operador u otro.
- **Compensación y rango de compensación:** A medida que mayor sea el grado en que se contrarrestan las distintas funciones de pertenencia de los conjuntos difusos agregados, el operador de agregación se adaptará mejor y ofrecerá mejores soluciones.
- **Comportamiento agregado:** El número de conjuntos agregados puede influir en los grados de pertenencia resultantes, por tanto, este hecho debe ser tenido en cuenta cuando se elige el operador.
- **Nivel de escala requerido de las funciones de pertenencia:** Algunos operadores pueden requerir diferentes niveles de escala para ser admisibles. En igualdad de condiciones se prefiere el que aporte un nivel de escala más bajo.

B.2. Operadores de Agregación

Como hemos mencionado, la determinación de las propiedades que debe cumplir un operador de acuerdo con las características específicas del problema que se pretende resolver, constituye un factor importante para la selección del operador adecuado en cada caso. Estas propiedades se suelen clasificar en dos grandes grupos: matemáticas y de comportamiento [74].

Un operador de agregación es definido formalmente a partir de sus propiedades matemáticas, como:

Definición 30 [10] *Una función $\Psi : [0, 1]^n \rightarrow [0, 1]$ es llamada operador de agregación si cumple las propiedades siguientes:*

(Monotonía) $\Psi(x_1, \dots, x_n) \leq \Psi(y_1, \dots, y_n)$ siempre que $x_i \leq y_i$ para todo $i \in \{1, \dots, n\}$,

(Identidad) $\Psi(x) = x$ para todo $x \in [0, 1]$,

(Contorno) $\Psi(0, \dots, 0) = 0$ y $\Psi(1, \dots, 1) = 1$.

Existen diversos estudios donde podemos encontrar descripciones detalladas de las propiedades matemáticas de los operadores de agregación [33, 64, 71, 74, 107, 170] y no pretendemos abordar este tema con profundidad en nuestra memoria de investigación, a continuación se detallan algunas propiedades matemáticas que pudieran ser deseables en la solución de determinado problema.

(Continuidad) Ψ es una función continua en cada una de sus variables.

Con esta propiedad se asegura que la existencia de pequeñas variaciones en los datos no provoque grandes saltos en el resultado.

(Conmutatividad) Para todo $(x_1, \dots, x_n) \in [0, 1]$, $\Psi(x_1, \dots, x_n) = \Psi(x_{\sigma(1)}, \dots, x_{\sigma(n)})$ siendo σ una permutación cualquiera de $\{1, \dots, n\}$.

Esta propiedad establece que el orden de los datos de entrada no debe afectar al resultado obtenido, siendo todos ellos tratados de la misma forma. Se deberá por lo tanto exigir en aquellos casos donde las valoraciones de los criterios que se pretende agregar tengan todos la misma importancia.

(Asociatividad) Para todo $n, m \in \mathbb{N}$, $\forall x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_m$ se cumple que

$$\Psi(x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_m) = \Psi(\Psi(x_1, \dots, x_n), \Psi(y_1, \dots, y_m))$$

Esta propiedad permite extender operadores definidos sobre dos variables a cualquier número de argumentos de forma inmediata y consistente [171]. Prácticamente ningún operador promedio es asociativo [64].

Por otra parte, las propiedades de comportamiento están mayormente relacionadas con el sentido intuitivo en el que un operador combina las preferencias. El estudio de este aspecto ha llevado a la siguiente clasificación [64].

1. Operadores conjuntivos:

Los resultados están acotados para toda x , $f(x) \leq \min(x)$. Exigen que todos los criterios agregados se satisfagan de forma simultánea, y por lo tanto el resultado de la agregación estará acotado superiormente por el menor de los distintos grados de satisfacción agregados. Ejemplos básicos de este tipo de operadores son las normas triangulares (o t-normas) que cumplen

las propiedades de asociatividad, simetría y tienen como elemento neutro 1 [107]. Entre las t-normas se incluyen el mínimo y el producto que se define como:

$$T_P(x, y) = x \cdot y \quad (\text{B.1})$$

2. Operadores disyuntivos:

En contraste con los operadores anteriores, los operadores disyuntivos están acotados para toda $x, f(x) \geq \max(x)$, es decir, generan un resultado que está acotado inferiormente por el mayor de los elementos agregados. Las c-normas triangulares (or t-conormas) [107] pertenecen a este grupo y ejemplo de ellas son el máximo y la suma probabilística que se define como:

$$S_P(x, y) = x + y - x \cdot y \quad (\text{B.2})$$

3. Operadores de promedio:

Los resultados están acotados para toda $x, \min(x) \leq f(x) \leq \max(x)$. Son operadores comprendidos entre el mínimo y el máximo. Al contrario de los dos casos extremos anteriores, describen una actitud de compensación o promediación de valores, devolviendo un valor comprendido entre ambos extremos. Este tipo incluye la media aritmética y sus transformaciones isomórficas (quasi-aritmética, geométrica, armónica y las *power*-medias, así como sus contrapartes ponderadas). Uno de los operadores más utilizados es la suma ponderada, definida para un vector de pesos $W = (w_1, \dots, w_n)$, $w_i \in [0, 1]$, $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ como:

$$X(x_1, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i \quad (\text{B.3})$$

Otro de los operadores más empleados es el OWA (*Ordered Weighted Averaging*) [210] en el cual, los pesos no están asociados a un valor predeterminado sino que están asociados a una posición determinada.

$$OWA(x_1, \dots, x_n) = \sum_{j=1}^n w_j \cdot y_j \quad (\text{B.4})$$

donde y_j es el j -ésimo mayor valor del conjunto $\{x_1, \dots, x_n\}$.

4. Operadores mixtos o híbridos:

Estos operadores no pertenecen a los dos primeros grupos. En esta clasificación se incluyen las uninormas [222] y nulnormas [32]. Una uninorma U es un operador binario conmutativo, asociativo y monótono con elemento neutro $e \in [0, 1]$ [71, 222], que se obtiene mediante la combinación una t -norma (en $[0, e]$) y una t -conorma (en $[e, 1]$) [64].

$$U(x, y) = \begin{cases} \varphi^{-1}(T_U(\varphi(x), \varphi(y))), & x, y \in [0, e] \\ \psi^{-1}(S_U(\psi(x), \psi(y))), & x, y \in [e, 1] \end{cases} \quad (\text{B.5})$$

donde $\varphi(x) = x/e$ y $\psi(x) = (x - e)/(1 - e)$.

En [215] Yager propuso la siguiente uninorma, a partir de una generalización del *Operador-3- Π* [220, 222]:

$$U_{\Pi}(x, y) = \frac{\frac{xy}{e}}{\frac{xy}{e} + \frac{\bar{x}\bar{y}}{1-e}} \quad (\text{B.6})$$

donde $\bar{x} = 1 - x$.

Esta clasificación de los operadores de agregación, está estrechamente relacionada con el comportamiento de refuerzo [160, 224]. Un operador de agregación Ψ tiene refuerzo hacia arriba si $\Psi(x_1, \dots, x_n) \geq \max_i[\Psi(x_i)]$. Por el contrario, tiene refuerzo hacia abajo si $\Psi(x_1, \dots, x_n) \leq \min_i[\Psi(x_i)]$. En contraste, el refuerzo total comprende ambos comportamientos.

Lógicamente las t -normas y t -conormas exhiben refuerzos hacia abajo y hacia arriba respectivamente mientras que entre los operadores con refuerzo total se encuentran los pertenecientes a las familias aditiva y producto de operadores FI-MICA (Agregación con Identidad Fija, Monotonía, Identidad y Conmutatividad) y las uninormas [224].

Apéndice C

Recopilación de Preferencias para el Caso de Estudio

En el Capítulo 4 de esta memoria de investigación, se ha presentado como Caso de Estudio la EIIA del proyecto *Reconversión Tecnológica de la Planta de Cloro Sosa de Sagua la Grande* aplicando el MH-EIIA. En este apéndice, se muestran las valoraciones de los expertos recopiladas en la segunda fase del modelo, después de la definición del Marco de Heterogéneo de Evaluación.

En las siguientes tablas se recogen las preferencias emitidas por los tres expertos para cada uno de los impactos identificados.

Tabla C.1: Preferencias para los impactos I_{11} , I_{13} , I_{15} , I_{16} y I_{110}

E	C	I_{11}	I_{13}	I_{15}	I_{16}	I_{110}
e_1	c_1	B	M	M	B	MB
	c_2	M	M	M	M	MB
	c_3	0	0	0	0	0
	c_4	0.83	0.50	0.50	0.67	0.83
	c_5	1.00	0.50	0.50	0.67	0.83
	c_6	M	B	B	M	M
	c_7	M	B	B	B	B
	c_8	A	A	A	A	B
	c_9	MB	M	MB	MB	MB
	c_{10}	M	M	M	M	M
e_2	c_1	B	M	M	M	MB
	c_2	M	M	M	B	MB
	c_3	0	0	0	0	0
	c_4	1.00	0.83	0.17	1.00	0.50
	c_5	1.00	1.00	0.17	1.00	0.50
	c_6	A	B	B	M	M
	c_7	B	B	B	M	B
	c_8	A	A	A	A	B
	c_9	MB	M	MB	MB	MB
	c_{10}	M	M	M	M	B
e_3	c_1	B	M	B	B	MB
	c_2	M	B	M	M	MB
	c_3	0	0	0	0	0
	c_4	0.50	0.67	0.67	0.83	0.67
	c_5	0.50	0.50	0.50	1.00	0.83
	c_6	M	B	B	M	B
	c_7	M	B	B	M	B
	c_8	A	A	A	A	B
	c_9	MB	M	MB	MB	MB
	c_{10}	M	M	M	M	M

Tabla C.2: Preferencias para los impactos I_{21} , I_{22} , I_{24} , I_{25} , I_{26} , I_{28} y I_{210}

E	C	I_{21}	I_{22}	I_{24}	I_{25}	I_{26}	I_{28}	I_{210}
e_1	c_1	A	B	A	B	M	MB	M
	c_2	M	M	A	B	M	MB	M
	c_3	0	0	0	0	0	0	0
	c_4	0.83	1.00	0.67	0.17	1.00	0.50	0
	c_5	0.83	1.00	0.83	0	0.83	0.50	0
	c_6	M	B	M	B	B	B	M
	c_7	B	B	B	B	B	B	M
	c_8	A	A	M	B	B	B	A
	c_9	B	M	M	B	M	MB	A
	c_{10}	B	B	M	B	B	B	M
e_2	c_1	M	M	M	M	M	MB	M
	c_2	A	B	M	M	M	MB	M
	c_3	0	0	0	0	0.40	0	0
	c_4	1.00	0.83	1.00	0.17	0.17	0	0
	c_5	0.83	0.83	1.00	0	0.17	0	0
	c_6	M	B	M	B	B	M	M
	c_7	B	B	B	B	B	M	M
	c_8	A	A	M	B	M	B	M
	c_9	M	M	M	MB	M	MB	A
	c_{10}	B	B	M	B	B	M	M
e_3	c_1	M	M	M	M	M	MB	M
	c_2	M	B	A	M	A	M	M
	c_3	0	0	0	0	0	0	0
	c_4	1.00	0.67	1.00	0.17	0.83	0.83	0
	c_5	1.00	0.83	1.00	0	0.83	0.83	0
	c_6	M	B	M	B	B	M	M
	c_7	B	B	B	B	B	M	M
	c_8	M	A	M	B	M	B	A
	c_9	B	A	B	B	B	MB	M
	c_{10}	M	B	M	B	M	M	M

Tabla C.3: Preferencias para los impactos I_{31} , I_{32} , I_{33} , I_{34} , I_{35} , I_{36} , I_{37} , I_{38} y I_{310}

E	C	I_{31}	I_{32}	I_{33}	I_{34}	I_{35}	I_{36}	I_{37}	I_{38}	I_{310}
e_1	c_1	MB	MB	B	MB	B	MB	B	MB	B
	c_2	B	B	MB	MB	MB	B	MB	MB	B
	c_3	0.20	0.60	0.20	0.20	0.20	0	0	0	0.20
	c_4	0	0.50	0	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0
	c_5	0	0	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0
	c_6	M	B	M	B	B	B	B	B	M
	c_7	B	B	B	B	B	B	B	B	B
	c_8	A	M	B	A	B	B	B	B	A
	c_9	M	MB	MB	MB	B	MB	MB	MB	B
	c_{10}	B	B	M	M	B	M	M	B	M
e_1	c_1	MB	MB	MB	B	B	MB	MB	MB	M
	c_2	MB	B	MB	B	MB	MB	MB	B	B
	c_3	0.20	0.60	0.20	1.00	0.20	0	0	0	0.60
	c_4	0	0.67	0	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0
	c_5	0	0.08	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0
	c_6	B	B	M	M	B	M	B	B	M
	c_7	B	B	B	B	B	B	B	B	B
	c_8	A	A	B	A	A	B	B	B	A
	c_9	A	MB	MB	MB	B	B	MB	MB	B
	c_{10}	B	B	M	M	B	B	M	B	M
e_1	c_1	MB	MB	MB	B	MB	MB	MB	MB	B
	c_2	MB	MB	MB	MB	MB	B	MB	MB	B
	c_3	0.40	0.80	0.20	0.40	0.20	0.20	0.20	0.40	0.20
	c_4	0	1.00	0	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0
	c_5	0	0.25	0.21	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0
	c_6	M	B	M	M	B	B	B	B	M
	c_7	B	B	B	B	B	B	B	B	B
	c_8	A	M	B	A	B	B	B	B	M
	c_9	A	MB	MB	MB	MB	MB	MB	B	B
	c_{10}	B	B	M	M	B	B	B	M	M

Tabla C.4: Preferencias para los impactos I_{41} , I_{43} , I_{44} , I_{45} , I_{46} , I_{47} , I_{48} , I_{49} y I_{410}

E	C	I_{41}	I_{43}	I_{44}	I_{45}	I_{46}	I_{47}	I_{48}	I_{49}	I_{410}
e_1	c_1	MB	B	B	B	M	B	B	MB	M
	c_2	MB	MB	B	MB	B	MB	MB	B	B
	c_3	0.20	0	1.00	0.40	0.40	0.60	0.40	0.20	0.40
	c_4	0	0	0.25	0.25	0	0.17	0.42	0	0
	c_5	0.17	0.17	3	0	0.17	0.17	0.17	0	0.17
	c_6	B	M	B	B	M	B	B	B	M
	c_7	B	B	B	B	B	B	B	B	B
	c_8	B	B	B	B	A	B	B	B	B
	c_9	MB	MB	MB	B	MB	MB	B	M	B
	c_{10}	B	M	B	B	M	M	B	B	A
e_2	c_1	B	MB	B	B	B	MB	MB	MB	MB
	c_2	B	MB	B	MB	B	MB	B	MB	MB
	c_3	0.20	0	1.00	0.40	0.40	0	0.40	0	0.40
	c_4	0	0	0.17	0.25	0	0.17	0.17	0	0
	c_5	0.33	0.17	0.17	0	0.17	0.17	0.17	0	0.25
	c_6	B	M	M	B	M	B	B	B	M
	c_7	B	B	B	B	B	B	B	B	B
	c_8	B	B	B	A	A	B	B	A	B
	c_9	B	MB	MB	B	B	MB	MB	MB	B
	c_{10}	B	M	B	B	M	B	B	B	M
e_3	c_1	MB	MB	B	B	B	B	B	MB	M
	c_2	MB	MB	B	MB	B	MB	MB	MB	B
	c_3	0.60	0	1.00	0.40	0.40	0.20	0.40	0	0.40
	c_4	0	0	0.17	0.17	0	0.17	0.17	0	0
	c_5	0.25	0.21	2	0	0.25	0.17	0.17	0	0.17
	c_6	B	M	M	B	M	B	B	B	M
	c_7	B	B	B	B	B	B	B	B	B
	c_8	B	B	B	B	A	B	B	A	B
	c_9	M	MB	MB	MB	MB	MB	B	B	B
	c_{10}	B	M	B	B	M	B	B	M	A

Tabla C.5: Preferencias para los impactos I_{51} , I_{52} , I_{53} , I_{54} , I_{55} , I_{56} , I_{58} , I_{59} y I_{510}

E	C	I_{51}	I_{52}	I_{53}	I_{54}	I_{55}	I_{56}	I_{58}	I_{59}	I_{510}
e_1	c_1	B	B	MB	A	M	B	B	B	M
	c_2	M	B	B	A	B	B	MB	MB	B
	c_3	0	0.40	0.20	0.40	0	0	0	0	0.40
	c_4	0.25	1.00	0.08	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
	c_5	0.25	0.17	0	0.17	0	0	0	0	0.17
	c_6	B	M	B	M	B	B	B	B	B
	c_7	B	B	B	B	B	B	B	B	B
	c_8	A	B	B	A	B	B	B	B	M
	c_9	A	A	MB	M	M	B	M	MB	B
	c_{10}	B	A	M	M	B	M	M	B	A
e_2	c_1	M	B	B	M	M	M	B	MB	MB
	c_2	B	B	B	M	B	B	MB	MB	B
	c_3	0	0.40	0.20	0.40	0	0	0	0	0.40
	c_4	0.33	1.00	0.08	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
	c_5	0.33	0.17	0	0.17	0	0	0	0	0.17
	c_6	B	M	B	M	B	B	B	B	B
	c_7	B	B	B	B	M	B	B	B	B
	c_8	A	B	B	A	B	B	B	B	M
	c_9	A	A	MB	M	M	B	M	MB	B
	c_{10}	B	A	M	M	M	M	M	B	A
e_3	c_1	B	M	MB	B	M	B	B	MB	M
	c_2	B	M	B	B	B	B	MB	MB	B
	c_3	0	0.40	0.20	0.40	0	0	0	0	0.40
	c_4	0.25	1.00	0.08	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
	c_5	0.25	0.17	0	0.17	0	0	0	0	0.17
	c_6	B	M	B	M	B	B	B	B	B
	c_7	M	B	B	B	B	B	B	B	B
	c_8	A	B	B	A	B	B	B	B	M
	c_9	M	A	MB	M	M	B	M	MB	B
	c_{10}	B	A	M	M	M	M	M	B	A

Tabla C.6: Preferencias para los impactos I_{61} , I_{62} , I_{63} , I_{64} , I_{65} , I_{66} , I_{67} , I_{68} , I_{69} y I_{610}

E	C	I_{61}	I_{62}	I_{63}	I_{64}	I_{65}	I_{66}	I_{67}	I_{68}	I_{69}	I_{610}
e_1	c_1	M	B	M	B	M	M	B	B	B	B
	c_2	M	B	B	M	M	B	M	M	MB	M
	c_3	0.40	0.40	0.50	0.40	0.40	0.40	0.40	0	0	0.40
	c_4	0.17	1.00	1	0.17	0.17	0	0.17	0	0	0.17
	c_5	0	1.00	1.00	0.17	0	0	0.17	0	0	0
	c_6	M	M	M	M	M	M	M	M	B	B
	c_7	M	B	B	B	B	B	B	M	B	B
	c_8	B	M	B	A	B	B	M	M	A	B
	c_9	M	A	M	A	M	M	A	MB	MB	B
	c_{10}	M	A	M	M	M	M	B	B	B	A
e_2	c_1	M	B	M	M	M	M	M	MB	MB	MB
	c_2	M	B	B	B	M	M	B	M	MB	B
	c_3	0.40	0.40	0.50	0.40	0.40	0.40	0.40	0	0	0.40
	c_4	0.17	1.00	1.00	0.25	0.17	0	0.17	0	0	0.17
	c_5	0	1.00	1.00	0.17	0	0	0.17	0	0	0
	c_6	M	M	M	M	M	M	M	M	B	M
	c_7	B	B	B	B	B	B	B	M	B	B
	c_8	B	M	B	A	B	B	M	A	A	B
	c_9	M	A	M	M	M	M	A	MB	MB	B
	c_{10}	M	A	M	M	M	M	B	M	B	A
e_3	c_1	M	M	M	B	B	M	B	B	MB	B
	c_2	M	M	B	M	M	M	M	M	MB	M
	c_3	0.40	0.40	0.50	0.40	0.40	0.40	0.40	0	0	0.40
	c_4	0.17	1.00	1.00	0.17	0.17	0	0.17	0	0	0.17
	c_5	0	1.00	1.00	0.17	0	0	0.17	0	0	0
	c_6	M	M	M	M	M	M	M	M	B	M
	c_7	B	B	B	B	B	B	B	M	B	B
	c_8	B	M	B	A	B	B	M	A	A	B
	c_9	M	A	M	M	M	M	A	MB	MB	B
	c_{10}	M	A	M	M	M	M	B	M	B	A

Tabla C.7: Preferencias para los impactos I_{71} , I_{72} , I_{74} , I_{75} , I_{76} , I_{77} , I_{78} y I_{710}

E	C	I_{71}	I_{72}	I_{74}	I_{75}	I_{76}	I_{77}	I_{78}	I_{710}
e_1	c_1	M	M	M	B	M	B	B	B
	c_2	M	M	M	M	M	M	B	B
	c_3	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0	0.40	0.40
	c_4	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
	c_5	0.17	0.17	0.25	0.17	0.17	0	0	0.17
	c_6	M	B	M	M	M	M	M	M
	c_7	A	B	A	A	A	M	A	A
	c_8	M	A	M	B	M	B	B	B
	c_9	B	MA	M	M	M	M	MB	M
	c_{10}	A	M	M	M	M	M	B	M
e_2	c_1	M	M	M	M	M	M	B	M
	c_2	A	M	M	M	M	MB	B	M
	c_3	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0	0.40	0.40
	c_4	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
	c_5	0.17	0.17	0.33	0.17	0.17	0	0	0.17
	c_6	M	B	M	M	M	M	M	M
	c_7	A	B	A	A	A	M	A	A
	c_8	B	A	B	B	B	B	B	B
	c_9	B	MA	M	M	M	M	MB	M
	c_{10}	A	M	M	M	M	M	B	M
e_3	c_1	M	M	M	B	M	MB	B	B
	c_2	M	M	M	B	M	B	B	M
	c_3	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0	0.40	0.40
	c_4	0.17	0.17	0.25	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
	c_5	0.17	0.17	0.25	0.17	0.17	0	0	0.17
	c_6	M	B	M	M	M	M	M	M
	c_7	A	B	A	A	A	M	A	A
	c_8	M	A	B	B	B	B	B	B
	c_9	B	MA	M	M	M	M	MB	M
	c_{10}	A	M	M	M	M	M	B	M

Tabla C.8: Preferencias para los impactos I_{82} , I_{83} , I_{85} , I_{86} , I_{87} , I_{89} y I_{810}

E	C	I_{82}	I_{83}	I_{85}	I_{86}	I_{87}	I_{89}	I_{810}
e_1	c_1	MB	B	M	M	B	B	B
	c_2	B	M	B	B	B	B	B
	c_3	0	1.00	0.40	0.40	0.40	0.50	0.40
	c_4	0	1.00	0.17	0	0.17	0.17	1.00
	c_5	0.17	1.00	0	0	0	0.17	1.00
	c_6	B	M	B	M	B	M	M
	c_7	B	B	B	A	M	M	B
	c_8	A	A	M	M	A	A	A
	c_9	MB	M	M	M	M	M	B
	c_{10}	B	M	M	M	M	M	A
e_2	c_1	MB	M	M	M	M	B	B
	c_2	B	M	M	M	B	M	B
	c_3	0	1.00	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
	c_4	0	1.00	0.25	0	0.17	0.17	1.00
	c_5	0.17	1.00	0	0	0	0.17	1.00
	c_6	B	M	M	M	M	M	M
	c_7	B	B	M	A	M	M	B
	c_8	A	A	M	M	A	A	A
	c_9	MB	M	M	M	M	M	B
	c_{10}	B	M	M	M	M	M	A
e_3	c_1	B	B	B	M	M	B	B
	c_2	B	B	M	B	B	B	B
	c_3	0	1.00	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
	c_4	0	1.00	0.17	0	0.17	0.17	1.00
	c_5	0.17	1.00	0	0	0	0.17	1.00
	c_6	B	M	B	M	B	M	M
	c_7	B	B	B	A	M	A	B
	c_8	A	A	B	M	A	A	A
	c_9	MB	M	M	M	M	M	B
	c_{10}	B	M	M	M	M	M	A

Bibliografía

- [1] *Information aggregation in intelligent systems: An application oriented approach*, Knowledge-Based Systems **38** (2013), no. 0, 3–13, Special Issue on.
- [2] A.M. Anile, S. Deodato, and G. Privitera, *Implementing fuzzy arithmetic*, Fuzzy Sets and Systems **72** (1995), no. 2, 239–250.
- [3] J. Antes, L. Campen, U. Derigs, C. Titze, and G.D. Wolle, *SYNOPSE: a model-based decision support system for the evaluation of flight schedules for cargo airlines*, Decision Support Systems **22** (1998), no. 4, 307–323.
- [4] B. Arfi, *Fuzzy decision making in politics: a linguistic fuzzy-set approach (LFSA)*, Political Analysis **13** (2005), 23–56.
- [5] K. Atanassov and G. Gargov, *Interval valued intuitionistic fuzzy sets*, Fuzzy Sets and Systems **31** (1989), no. 3, 343–349.
- [6] E. Barrenechea, J. Fernández, M. Pagola, F. Chiclana, and H. Bustince, *Construction of interval-valued fuzzy preference relations from ignorance functions and fuzzy preference relations. application to decision making*, Knowledge-Based Systems **58** (2014), no. 0, 33–44.
- [7] A. Bechara, D. Tranel, and H. Damasio, *Characterization of the decision-making deficit of patients with ventromedial prefrontal cortex lesions*, Brain **123** (2000), no. 11, 2189–2202.
- [8] H. Becker, *Computing with words and machine learning in medical diagnostics*, Information Science **134** (2001), no. 1-4, 53–69.

-
- [9] G. Beliakov, R. Mesiar, and L. Valaskova, *Fitting generated aggregation operators to empirical data*, International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems **12** (2004), no. 02, 219–236.
 - [10] G. Beliakov, A. Pradera, and T. Calvo, *Aggregation functions: A guide for practitioners*, 1st ed., Springer Publishing Company, Incorporated, 2008.
 - [11] G. Beliakov and J. Warren, *Appropriate choice of aggregation operators in fuzzy decision support systems*, IEEE Transactions on Fuzzy Systems **9** (2001), no. 6, 773–784.
 - [12] D. Ben-Arieh and Z. Chen, *Linguistic group decision-making: opinion aggregation and measures of consensus*, Fuzzy Optimization and Decision Making **5** (2006), no. 4, 371–386.
 - [13] D. Ben-Arieh and Z. Chen, *Linguistic-labels aggregation and consensus measure for autocratic decision making using group recommendations*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A (2006), 558–568.
 - [14] T. Bilgic, *Interval-valued preference structures*, European Journal of Operational Research **105** (1998), no. 1, 162–183.
 - [15] A. Blanco, M. Delgado, J.M. Martín, and M.P. Polo, *AIEIA: Software for fuzzy environmental impact assessment*, Expert Systems with Applications **36** (2009), no. 5, 9135 – 9149.
 - [16] L.A. Bojórquez, E. Ezcurra, and O. García, *Appraisal of environmental impacts and mitigation measures through mathematical matrices*, Journal of Environmental Management **53** (1998), no. 1, 91–99.
 - [17] L.A. Bojórquez, S. Sánchez, and A. Florez, *Building consensus in environmental impact assessment through multicriteria modeling and sensitivity analysis*, Environmental Management **36** (2005), no. 3, 469–481.
 - [18] P.P. Bonissone, *A fuzzy sets based linguistic approach: Theory and applications*, Proceedings of the 12th Conference on Winter Simulation (Piscataway, NJ, USA), WSC '80, IEEE Press, 1980, pp. 99–111.
-

-
- [19] P.P. Bonissone and K.S. Decker, *Selecting uncertainty calculi and granularity: An experiment in trading-off precision and complexity*, Uncertainty in Artificial Intelligence (L.N. Kanal and J.F. Lemmer, eds.), North-Holland, Amsterdam, 1986, pp. 217–247.
 - [20] G. Boole, *Calculus of finite differences*, Chelsea Publishing, 1970.
 - [21] G. Bordogna, M. Fedrizzi, and G. Pasi, *A linguistic modeling of consensus in group decision making based on OWA operators*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans **27** (1997), no. 1, 126–133.
 - [22] G. Bordogna, G. Ghisalberti, and G. Psaila, *Geographic information retrieval: Modeling uncertainty of user's context*, Fuzzy Sets and Systems **196** (2012), 105–124.
 - [23] 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 **44** (1993), no. 2, 70–82.
 - [24] P. Bosc, D. Kraft, and F. Petry, *Fuzzy sets in database and information systems: Status and opportunities*, Fuzzy Sets and Systems **156** (2005), no. 3, 418–426.
 - [25] B. Bouchon-Meunier, M. Rifqi, and S. Bothorel, *Towards general measures of comparison of objects*, Fuzzy Sets and Systems **84** (1996), no. 2, 143–153, Dedicated to the Memory of Professor Arnold Kaufmann.
 - [26] D. Bouyssou, T. Marchant, M. Pirlot, P. Perny, and A. Tsoukiyas., *Evaluation and decision models: A critical perspective*, Kluwer Academic Publishers, 2000.
 - [27] Z. Bubnicki, *Analysis and decision making in uncertain systems*, Communications and Control Engineering, Springer London, 2004.
 - [28] D. Bunn, *Applied decision analysis*, McGraw-Hill, 1984.
 - [29] P. Burillo and H. Bustince, *Construction theorems for intuitionistic fuzzy sets*, Fuzzy Sets and Systems **84** (1996), no. 3, 271–281.
-

-
- [30] ———, *Entropy on intuitionistic fuzzy sets and on interval-valued fuzzy sets*, Fuzzy Sets and Systems **78** (1996), no. 3, 305–316.
- [31] H. Bustince and P. Burillo, *Structures on intuitionistic fuzzy relations*, Fuzzy Sets and Systems **78** (1996), no. 3, 293–303.
- [32] T. Calvo, B. De Baets, and J. Fodor, *The functional equations of Frank and Alsina for uninorms and nullnorms*, Fuzzy Sets and Systems **120** (2001), no. 3, 385–394.
- [33] T. Calvo, A. Kolesárová, M. Komorníková, and R. Mesiar, *Aggregation operators: Properties, classes and construction methods*, Aggregation Operators (T. Calvo, G. Mayor, and R. Mesiar, eds.), Studies in Fuzziness and Soft Computing, vol. 97, Physica-Verlag HD, 2002, pp. 3–104.
- [34] T. Calvo, R. Mesiar, and R.R. Yager, *Quantitative weights and aggregation*, IEEE Transactions on Fuzzy Systems **12** (2004), no. 1, 62–69.
- [35] G. Campanella, A. Pereira, and R. Ribeiro, *A framework for dynamic multiple-criteria decision making*, Decision Support Systems **52** (2011), no. 1, 52–60.
- [36] G. Campanella, A. Pereira, R.A. Ribeiro, and M. Varela, *Collaborative dynamic decision making: A case study from B2B supplier selection*, Decision Support Systems—Collaborative Models and Approaches in Real Environments, Lecture Notes in Business Information Processing, vol. 121, Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 88–102.
- [37] R.A. Carrasco and P. Villar, *A new model for linguistic summarization of heterogeneous data: an application to tourism web data sources*, Soft Computing (2012), 135–151.
- [38] M. Castellanos, *Introducción a la problemática de la valoración económico ambiental*, Editorial Academia, 2007.
- [39] T. Chen, *Applying linguistic decision-making method to deal with service quality evaluation problems*, International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems **9** (2001), no. Supplement, 103–114.
-

-
- [40] Y. Chen and B. Li, *Dynamic multi-attribute decision making model based on triangular intuitionistic fuzzy numbers*, Scientia Iranica **18** (2011), no. 2, 268 – 274.
- [41] Y. Chen, X. Zeng, M. Happiette, P. Bruniaux, R. Ng, and W. Yu, *Optimisation of garment design using fuzzy logic and sensory evaluation techniques*, Eng. Appl. Artif. Intell. **22** (2009), no. 2, 272–282.
- [42] C. Cheng and Y. Lin, *Evaluating the best main battle tank using fuzzy decision theory with linguistic criteria evaluation*, European Journal of Operational Research **142** (2002), no. 1, 174–186.
- [43] H. Chernoff, *Elementary decision theory*, Dover Publications, 1987.
- [44] F. Chiclana, F. Herrera, and E. Herrera-Viedma, *Integrating three representation models in fuzzy multipurpose decision making based on fuzzy preference relations*, Fuzzy Sets and Systems **97** (1998), no. 1, 33–48.
- [45] D. Choi, B. Ahn, and S. Kim, *Multicriteria group decision making under incomplete preference judgments: Using fuzzy logic with a linguistic quantifier*, International Journal of Intelligent Systems **22** (2007), no. 6, 641–660.
- [46] S.J. Chuu, *Fuzzy multi-attribute decision-making for evaluating manufacturing flexibility*, Production Planning & Control **16** (2005), no. 3, 323–335.
- [47] ———, *Evaluating the flexibility in a manufacturing system using fuzzy multi-attribute group decision-making with multi-granularity linguistic information*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology **32** (2007), no. 3-4, 409–421.
- [48] R.T. Clemen, *Making hard decisions: An introduction to decision analysis*, Business Statistics Series, Duxbury Press, 1996.
- [49] V. Conesa, *Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental*, 4ta ed., Mundi-Prensa, 2010.
- [50] O. Cerdón, F. Herrera, and I. Zwir, *Linguistic modeling by hierarchical systems of linguistic rules*, IEEE Transactions on Fuzzy Systems **10** (2002), no. 1, 2–20.
-

-
- [51] J. Cui, S. Liu, Y. Dang, N. Xie, and B. Zeng, *A grey multi-stage dynamic multiple attribute decision making method*, 2011 IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services (GSIS), 2011, pp. 548–550.
 - [52] V. Cutello and J. Montero, *Hierarchies of aggregation operators*, International Journal of Intelligent Systems **9** (1994), no. 11, 1025–1045.
 - [53] R.M. Darbra, E. Eljarrat, and D. Barceló, *How to measure uncertainties in environmental risk assessment*, Trends in Analytical Chemistry **27** (2008), no. 4, 377–385.
 - [54] R. de Andrés, J.L. García-Lapresta, and L. Martínez, *A multi-granular linguistic model for management decision-making in performance appraisal*, Soft Computing **14** (2009), no. 1, 21–34.
 - [55] Gobierno de Cuba, *Constitución de la república*, 1940.
 - [56] ———, *Ley 81 de medio ambiente*, 1997.
 - [57] R. Degani and G. Bortolan, *The problem of linguistic approximation in clinical decision making*, International Journal of Approximate Reasoning **2** (1988), no. 2, 143–162.
 - [58] M. Delgado, J.L. Verdegay, and M.A. Vila, *Linguistic decision-making models*, International Journal of Intelligent Systems **7** (1992), no. 5, 479–492.
 - [59] Y. Devouassoux, S. Reynaud, G. Jonniaux, R. Ribeiro, and T. Pais, *Hazard avoidance developments for planetary exploration*, 7th International ESA Conference on Guidance, Navigation & Control Systems, GNC (Tralee, Ireland), Jun 2008.
 - [60] E. Diehl, *Participatory simulations as training tools a study based on the market growth model*, International Conference of the System Dynamics Society (California, USA), 1988, pp. 52–65.
 - [61] O. Duarte, I. Requena, and Y. Rosario, *Fuzzy techniques for environmental-impact assessment in the mineral deposit of Punta Gorda (Moa, Cuba)*, Environmental Technology **28** (2007), no. 6, 659–669.
-

-
- [62] D. Dubois, *Fuzzy sets and systems: Theory and applications*, Academic Press, Inc., Orlando, FL, USA, 1997.
- [63] D. Dubois and H. Prade, *Rough fuzzy sets and fuzzy rough sets*, International Journal of General Systems **17** (1990), no. 2–3, 191–209.
- [64] D. Dubois and H. Prade, *On the use of aggregation operations in information fusion processes*, Fuzzy Sets and Systems **142** (2004), no. 1, 143–161.
- [65] ———, *An introduction to bipolar representations of information and preference*, International Journal of Intelligent Systems **23** (2008), no. 8, 866–877.
- [66] W. Edwards, *Dynamic decision theory and probabilistic information processes*, Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society **4** (1962), no. 2, 59–74.
- [67] M. Enea and G. Salemi, *Fuzzy approach to the environmental impact evaluation*, Ecological Modelling **136** (2001), no. 2–3, 131–147.
- [68] M. Espinilla, R. de Andrés, F.J. Martínez, and L. Martínez, *A 360-degree performance appraisal model dealing with heterogeneous information and dependent criteria*, Information Sciences **222** (2013), 459–471.
- [69] M. Espinilla, I. Palomares, L. Martínez, and D. Ruan, *A comparative study of heterogeneous decision analysis approaches applied to sustainable energy evaluation*, International Journal on Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-based Systems **20** (2012), no. supp01, 159–174.
- [70] J.C. Fodor and M. Roubens, *Fuzzy preference modelling and multicriteria decision support*, Kluwer Academic Publishers, 1994.
- [71] J.C. Fodor, R.R. Yager, and A. Rybalov, *Structure of uninorms*, International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems **05** (1997), no. 04, 411–427.
- [72] I. Georgescu, *Similarity of fuzzy choice functions*, Fuzzy Sets and Systems **158** (2007), no. 12, 1314–1326.
- [73] D. Gómez-Orea, *Un instrumento preventivo para la gestión ambiental*, Editorial Agrícola Española SA, 1999.
-

-
- [74] M. Grabisch, *Fuzzy integral as a flexible and interpretable tool of aggregation*, Aggregation and Fusion of Imperfect Information (Bernadette Bouchon-Meunier, ed.), Studies in Fuzziness and Soft Computing, vol. 12, Physica-Verlag HD, 1998, pp. 51–72.
- [75] M. Grabisch, B. De Baets, and J. Fodor, *The quest for rings on bipolar scales*, International Journal of Uncertainty, Fuzziness, and Knowledge-Based Systems **12** (2004), no. 4, 499–512.
- [76] S. Greco, B. Matarazzo, and R. Slowinski, *Rough sets theory for multicriteria decision analysis*, European Journal of Operational Research **129** (2001), no. 1, 1–47.
- [77] N. Halouani, H. Chabchoub, and J.M. Martel, *PROMETHEE-MD-2T method for project selection*, European Journal of Operational Research **195** (2009), no. 3, 841–849.
- [78] F. Herrera, S. Alonso, F. Chiclana, and E. Herrera-Viedma, *Computing with words in decision making: foundations, trends and prospects*, Fuzzy Optimization and Decision Making **8** (2009), no. 4, 337–364.
- [79] F. Herrera and E. Herrera-Viedma, *Choice functions and mechanisms for linguistic preference relations*, European Journal of Operational Research **120** (2000), no. 1, 144–161.
- [80] ———, *Linguistic decision analysis: steps for solving decision problems under linguistic information*, Fuzzy Sets and Systems **115** (2000), no. 1, 67 – 82.
- [81] 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 **114** (2000), no. 1, 43– 58.
- [82] F. Herrera and L. Martínez, *A 2-tuple fuzzy linguistic representation model for computing with words*, IEEE Transactions on Fuzzy Systems **8** (2000), no. 6, 746–752.
-

-
- [83] F. Herrera and L. Martínez, *An approach for combining linguistic and numerical information based on the 2-tuple fuzzy linguistic representation model in decision-making*, International Journal of Uncertainty Fuzziness and Knowledge-Based System **8** (2000), no. 5, 539–562.
- [84] ———, *The 2-tuple linguistic computational model. advantages of its linguistic description, accuracy and consistency.*, International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems **9** (2001), 33–48.
- [85] F. Herrera and L. Martínez, *A model based on linguistic 2-tuples for dealing with multigranular hierarchical linguistic contexts in multi-expert decision-making*, Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on **31** (2001), no. 2, 227–234.
- [86] F. Herrera, L. Martínez, and P.J. Sánchez, *Managing non-homogeneous information in group decision making*, European Journal of Operational Research **166** (2005), 115–132.
- [87] E. Herrera-Viedma, S. Alonso, F. Chiclana, and F. Herrera, *A consensus model for group decision making with incomplete fuzzy preference relations*, Fuzzy Systems, IEEE Transactions on **15** (2007), no. 5, 863–877.
- [88] E. Herrera-Viedma and A.G. López-Herrera, *A model of an information retrieval system with unbalanced fuzzy linguistic information: Research articles*, International Journal of Intelligent Systems **22** (2007), no. 11, 1197–1214.
- [89] E. Herrera-Viedma, L. Martínez, F. Mata, and F. Chiclana, *A consensus support system model for group decision-making problems with multigranular linguistic preference relations*, Fuzzy Systems, IEEE Transactions on **13** (2005), no. 5, 644–658.
- [90] E. Herrera-Viedma, L. Martínez, F. Mata, and F. Chiclana, *A consensus support system model for group decision-making problems with multigranular linguistic preference relations*, IEEE Transactions on Fuzzy Systems **13** (2005), no. 5, 644–658.
-

-
- [91] U. Höhle and S.E. Rodabaugh, *Mathematics of fuzzy sets: Logic, topology, and measure theory*, Handbooks of fuzzy sets series, Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [92] R.A. Howard, *Decision analysis: practice and promise*, Management Science **34** (1988), no. 6, 679–695.
- [93] ———, *The foundations of decision analysis revisited*, Advances in decision analysis: From foundations to applications (2007), 32–56.
- [94] M. Hsu, M. Baht, R. Adolfs, D. Tranel, and C.F. Camarero, *Neural systems responding to degrees of uncertainty in human decision-making*, Science **310** (2005), 1680–1683.
- [95] C.L. Hwang and K. Yoon, *Multiple attribute decision making: Methods and applications*, Springer-Verlag, Berlin, 1981.
- [96] A. Ijas, M.T. Kuitunen, and K. Jalava, *Developing the RIAM method (Rapid Impact Assessment Matrix) in the context of impact significance assessment*, Environmental Impact Assessment Review **30** (2010), no. 2, 82–89.
- [97] H. Ishibuchi, T. Nakashima, and M. Nii, *Classification and modeling with linguistic information granules: Advanced approaches to linguistic data mining (advanced information processing)*, Springer-Verlag New York, Inc., Secaucus, NJ, USA, 2004.
- [98] A. Ishizaka and P. Nemery, *Multi-criteria Decision Analysis: Methods and Software*, John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- [99] Y.L. Jiang, *An approach to group decision making based on interval fuzzy preference relations*, Journal of Systems Science and Systems Engineering **16** (2007), no. 1, 113–120.
- [100] A. Jiménez, S. Ríos-Insua, and A. Mateos, *A decision support system for multiattribute utility evaluation based on imprecise assignments*, Decision Support Systems **36** (2003), no. 1, 65–79.
- [101] J. Kacprzyk, *Group decision making with a fuzzy linguistic majority*, Fuzzy Sets and Systems **18** (1986), no. 2, 105 – 118.
-

-
- [102] J. Kacprzyk, M. Fedrizzi, and H. Nurmi, *Group decision making and consensus under fuzzy preferences and fuzzy majority*, Fuzzy Sets and Systems **49** (1992), no. 1, 21 – 31.
- [103] J. Kacprzyk and S. Zadrozny, *Computing with words in intelligent database querying: standalone and internet-based applications*, Information Sciences **134** (2001), no. 1–4, 71–109.
- [104] ———, *Towards a general and unified characterization of individual and collective choice functions under fuzzy and nonfuzzy preferences and majority via the ordered weighted average operators*, International Journal of intelligent Systems **24** (2009), no. 1, 4–26.
- [105] R.L. Keeney and H. Raiffa, *Decisions with multiple objectives: Preferences and value tradeoffs*, Cambridge University Press, 1993.
- [106] G.A. Kiker, T.S. Bridges, A. Varghese, T.P. Seager, and I. Linkov, *Application of multicriteria decision analysis in environmental decision making*, Integrated Environmental Assessment and Management **1** (2005), no. 2, 95–108.
- [107] E.P. Klement, R. Mesiar, and E. Pap, *Triangular norms*, Trends in logic, Studia logica library, Springer, 2000.
- [108] B. Kontic, *Why are some experts more credible than others?*, Environmental Impact Assessment Review **20** (2000), no. 4.
- [109] D.H. Kraft and F.E. Petry, *Fuzzy information systems: managing uncertainty in databases and information retrieval systems*, Fuzzy Sets and Systems **90** (1997), no. 2, 183–191.
- [110] S. Kundu, *Min-transitivity of fuzzy leftness relationship and its application to decision making*, Fuzzy Sets and Systems **86** (1997), no. 3, 357–367.
- [111] Battelle-Columbus Laboratories, *Contract no. 14-06-d-7182*, ch. Environmental evaluation system for water resource planning, Bureau of reclamation. US Department of the Interior, 1972.
-

-
- [112] D.P. Lawrence, *Impact significance determination—Pushing the boundaries*, Environmental Impact Assessment Review **27** (2007), no. 8, 770–788.
- [113] ———, *Environmental Impact Assessment. Practical solutions to recurrent problems and contemporary challenges*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2013.
- [114] J. Lawry, *A methodology for computing with words*, International Journal of Approximate Reasoning **28** (2001), no. 2–3, 51–89.
- [115] H.M. Lee, *Applying fuzzy set theory to evaluate the rate of aggregative risk in software development*, Fuzzy Sets and Systems **79** (1996), no. 3, 323–336.
- [116] L.B. Leopold, F.E. Clarke, B.B. Hanshaw, and J.R. Balsley, *A procedure for evaluating environmental impact*, ch. US Geological Survey, Circular 645 Elsevier Science, 1971.
- [117] D.F. Li, Z.G. Huang, and G.H. Chen, *A systematic approach to heterogeneous multiattribute group decision making*, Computers & Industrial Engineering **59** (2010), no. 4, 561–572.
- [118] X. Li, D. Ruan, J. Liu, and Y. Xu, *A linguistic-valued weighted aggregation operator to multiple attribute group decision making with quantitative and qualitative information*, International Journal of Computational Intelligent Systems **1** (2008), no. 3, 274–284.
- [119] Y. Li, J. Deng, and M. Wei, *Meaning and precision of adaptive fuzzy systems with gaussian-type membership functions*, Fuzzy Sets and Systems **127** (2002), no. 1, 85–97.
- [120] Y. Lin, P. Lee, and H. Ting, *Dynamic multi-attribute decision making model with grey number evaluations*, Expert Systems with Applications **35** (2008), 1638–1644.
- [121] H. Liu, J. Cai, and L. Martínez, *The importance weighted continuous generalized ordered weighted averaging operator and its application to group decision making*, Knowledge-based Systems **48** (2013), no. 1, 24–36.
-

-
- [122] H. Liu and R.M. Rodríguez, *A fuzzy envelope for hesitant fuzzy linguistic term set and its application to multicriteria decision making*, Information Sciences **258** (2014), 220–238.
- [123] K.F.R. Liu and J.H. Lai, *Decision-support for environmental impact assessment: A hybrid approach using fuzzy logic and fuzzy analytic network process*, Expert Systems with Applications **36** (2009), no. 3, Part 1, 5119 – 5136.
- [124] ———, *Decision-support for environmental impact assessment: A hybrid approach using fuzzy logic and fuzzy analytic network process*, Expert Systems with Applications **36** (2009), no. 3, Part 1, 5119–5136.
- [125] A.R. Lock, *Applying decision analysis in an organisational context*, Analysing and Aiding Decision Processes (O. Svenson P. Humphreys and A. Vari, eds.), Advances in Psychology, vol. 14, North-Holland, 1983, pp. 145 – 166.
- [126] B. Lohani, J.W. Evans, H. Ludwig, R.R. Everitt, R.A. Carpenter, and S.L. Tu, *Environmental impact assessment for developing countries in asia*, Asian Development Bank, 1997.
- [127] A.G. López-Herrera, E. Herrera-Viedma, and F. Herrera, *Applying multi-objective evolutionary algorithms to the automatic learning of extended boolean queries in fuzzy ordinal linguistic information retrieval systems*, Fuzzy Sets and Systems **160** (2009), no. 15, 2192–2205.
- [128] B. Loran, *Quantitative assessment of environmental impact*, Journal of Environmental Systems **5** (1975), no. 1, 247–256.
- [129] J. Lu, G. Zhang, and D. Ruan, *Intelligent multi-criteria fuzzy group decision-making for situation assessments*, Soft Computing **12** (2007), no. 3, 289–299.
- [130] L. Martínez, *Sensory evaluation based on linguistic decision analysis*, International Journal of Approximate Reasoning **44** (2007), no. 2, 148–164.
- [131] L. Martínez, M. Espinilla, J. Liu, L.G. Pérez, and P.J. Sánchez, *An evaluation model with unbalanced linguistic information applied to olive oil sensory evaluation*, Multiple-Valued Logic and Soft Computing **15** (2009), no. 2-3, 229–251.
-

-
- [132] L. Martínez and F. Herrera, *An overview on the 2-tuple linguistic model for computing with words in decision making: Extensions, applications and challenges*, Information Sciences **207** (2012), no. 1, 1–18.
- [133] L. Martínez, J. Liu, D. Ruan, and J.B. Yang, *Dealing with heterogeneous information in engineering evaluation processes*, Information Sciences **177** (2007), no. 7, 1533–1542.
- [134] L. Martínez, L.G. Pérez, and J. Liu, *A linguistic decision based model applied to olive oil sensory evaluation*, Fuzzy Sets and Their Extensions: Representation, Aggregation and Models (H. Bustince, F. Herrera, and J. Montero, eds.), Studies in Fuzziness and Soft Computing, vol. 220, Springer Berlin Heidelberg, 2008, pp. 317–334.
- [135] L. Martínez, D. Ruan, and F. Herrera, *Computing with words in decision support systems: An overview on models and applications*, International Journal of Computational Intelligent Systems **3** (2010), no. 4, 382–395.
- [136] F. Mata, J.C. Martínez, and R.M. Rodríguez, *A web-based consensus support system dealing with heterogeneous information*, Consensual Processes, Studies in Fuzziness and Soft Computing, Springer, 2011, pp. 357–381.
- [137] J. M. Mendel, *Computing with words: Zadeh, turing, popper and occam*, Computational Intelligence Magazine **2** (2007), no. 4, 10–17.
- [138] J.M. Mendel, *Computing with words and its relationships with fuzzistics*, Information Science **177** (2007), no. 4, 988–1006.
- [139] J.M. Merigó, M. Casanovas, and L. Martínez, *Linguistic aggregation operators for linguistic decision making based on the Dempster-Shafer theory of evidence*, International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems **18** (2010), no. 3, 287–304.
- [140] J.M. Merigó and A.M. Gil, *A method for decision making based on generalized aggregation operators*, International Journal of Intelligent Systems **28** (2013), no. 5, 453–473.
-

-
- [141] G.A. Miller, *The magical number seven plus or minus two: Some limits on our capacity of processing information*, Psychological Review **63** (1956), 81–97.
- [142] T. Miyoshi and H. Joichi, *The improvement of web page retrieval by page grouping using fuzzy reasoning*, International Journal of Innovative Computing, Information & Control **2** (2006), 237247.
- [143] J.N. Moderson and P.S. Nair, *Fuzzy mathematics*, Physica-Verlag, New York, 1998.
- [144] J. Montero, *Arrow's theorem under fuzzy rationality*, Behavioral Science **32** (1987), no. 4, 267–273.
- [145] V.O.S. Olunloyo, A.M. Ajofoyinbo, and O. Ibidapo-Obe, *On development of fuzzy controller: The case of gaussian and triangular membership functions*, Journal of Signal and Information Processing **2** (2011), 257–265.
- [146] S.A. Orlovsky, *Decision-making with a fuzzy preference relation*, Fuzzy Sets and Systems **1** (1978), no. 3, 155–167.
- [147] T. Pais and R. Ribeiro, *Contributions to dynamic multicriteria decision making models*, International Fuzzy Systems Association World Congress and European Society of Fuzzy Logic and Technology Conference (Lisbon, Portugal,) (J. Carvalho, D. Dubois, U. Kaymak, and J. da Costa, eds.), 2009, pp. 719–724.
- [148] T.C. Pais, R.A. Ribeiro, and L.F. Simoes, *Uncertainty in dynamically changing input data*, Computational Intelligence in Complex Decision Systems, Atlantis Computational Intelligence Systems, vol. 2, Atlantis Press, 2010, pp. 47–66.
- [149] I. Palomares, R.M. Rodríguez, and L. Martínez, *An attitude-driven web consensus support system for heterogeneous group decision making*, Expert Systems with Applications **40** (2013), no. 1, 139–149.
- [150] E. Pap, *g-calculus*, Zbornik Radova Prirodno–matematičkog Fakulteta: Serija za matematiku **23** (1993), no. 1, 145–156.
-

- [151] E. Pap, *Handbook of measure theory: In two volumes*, vol. 2, Elsevier Science, 2002.
 - [152] E. Pap, *Applications of the generated pseudo-analysis on nonlinear partial differential equations*, Contemporary Mathematics (2005), no. 377, 239–259.
 - [153] C. Pastakia and A. Jensen, *The rapid impact assessment matrix (riam) for eia*, Environmental Impact Assessment Review **18** (1998), no. 5, 461–482.
 - [154] R. Peche and E. Rodríguez, *Environmental impact assessment by means of a procedure based on fuzzy logic: A practical application*, Environmental Impact Assessment Review **31** (2011), no. 2, 87–96.
 - [155] W. Pedrycz, *Fuzzy modelling: Paradigms and practices*, Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, USA, 1996.
 - [156] W. Pedrycz, P. Ekel, and R. Parreiras, *Fuzzy multicriteria decision-making: Models, methods and applications*, John Wiley & Sons, Chichester, West Sussex, U.K., 2011.
 - [157] W. Pedrycz and F. Gomide, *An introduction to fuzzy sets: Analysis and design*, A Bradford book, MIT Press, 1998.
 - [158] J.I. Peláez and J.M. Doña, *LAMA: A linguistic aggregation of majority additive operator*, International Journal of Intelligent Systems **18** (2003), no. 7, 809–820.
 - [159] F.E. Petry, *Fuzzy set theory utility for database and information systems*, On Fuzziness (R. Seising, E. Trillas, C. Moraga, and S. Termini, eds.), Studies in Fuzziness and Soft Computing, vol. 299, Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 547–552.
 - [160] R.A. Ribeiro, T.C. Pais, and L.F. Simoes, *Benefits of full-reinforcement operators for spacecraft target landing*, Preferences and Decisions (S.Greco, R.A. Marques, M. Squillante, R.R. Yager, and J. Kacprzyk, eds.), Studies in Fuzziness and Soft Computing, vol. 257, Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 353–367.
-

-
- [161] P.G. Richardson and A.L. Pugh, *Introduction to system dynamics modeling with dynamo*, MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1981.
- [162] R.M. Rodríguez, L. Martínez, and F. Herrera, *Hesitant fuzzy linguistic term sets for decision making*, IEEE Transactions on Fuzzy Systems **20** (2012), no. 1, 109–119.
- [163] M. Roubens, *Some properties of choice functions based on valued binary relations*, European Journal of Operational Research **40** (1989), no. 3, 309–321.
- [164] M. Roubens, *Fuzzy sets and decision analysis*, Fuzzy Sets Syst. **90** (1997), no. 2, 199–206.
- [165] M. Roubens and P. Vincke, *Preference modelling*, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 1985.
- [166] E.H. Ruspini, *A new approach to clustering*, Information and Control **15** (1969), no. 1, 22–32.
- [167] T. Saaty, *The analytic hierarchy process*, McGraw–Hill, New York, 1980.
- [168] ———, *Time dependent decision-making; dynamic priorities in the AHP/ANP: Generalizing from points to functions and from real to complex variables*, Mathematical and Computer Modelling **46** (2007), no. 7–8, 860–891.
- [169] P. Salminen, J. Hokkanen, and R. Lahdelma, *Comparing multicriteria methods in the context of environmental problems*, European Journal of Operational Research **104** (1998), no. 3, 485–496.
- [170] S. Saminger-Platz, R. Mesiar, and D. Dubois, *Aggregation operators and commuting*, IEEE Transactions on Fuzzy Systems **15** (2007), no. 6, 1032–1045.
- [171] W. Sander, *Associative aggregation operators*, Aggregation Operators (T. Calvo, G. Mayor, and R. Mesiar, eds.), Studies in Fuzziness and Soft Computing, vol. 97, Physica-Verlag HD, 2002, pp. 124–158.
-

-
- [172] K.J. Schmucke, *Fuzzy sets: Natural language computations, and risk analysis*, Applications of computer science series, Computer Science Press, 1984.
- [173] R.B. Shepard, *Quantifying environmental impact assessments using fuzzy logic*, Springer Series on Environmental Management, Springer, 2005.
- [174] Y.J. Si and F.J. Wei, *Dynamic multiattribute decision making based on the intuitionistic fuzzy priority rating model*, International Conference on Management Science and Engineering (ICMSE 2009), 2009, pp. 239–245.
- [175] W. Silvert, *Ecological impact classification with fuzzy sets*, Ecological Modelling **96** (1997), no. 1–3, 1–10.
- [176] J. Sterman, *Testing behavioral simulation models by direct experiment*, Management Science **33** (1987), 1572–1592.
- [177] Z.X. Su, M.Y. Chen, G.P. Xia, and L. Wang, *An interactive method for dynamic intuitionistic fuzzy multi-attribute group decision making*, Expert Systems with Applications **38** (2011), no. 12, 15286 – 15295.
- [178] Y. Tang and J. Zheng, *Linguistic modelling based on semantic similarity relation among linguistic labels*, Fuzzy Sets and Systems **157** (2006), no. 12, 1662–1673.
- [179] T. Tanino, *Fuzzy preference orderings in group decision making*, Fuzzy Sets and Systems **12** (1984), no. 2, 117–131.
- [180] ———, *Multiperson decision making using fuzzy sets and possibility theory*, ch. On group decision making under fuzzy preferences, pp. 172–185, Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [181] J.M. Tapia, M.J. del Moral, M.A. Martínez, and E. Herrera-Viedma, *A consensus model for group decision making problems with linguistic interval fuzzy preference relations*, Expert Systems with Applications **39** (2012), no. 11, 10022 – 10030.
- [182] D. Teng, *Topsis method for dynamic evaluation of hi-tech enterprise’s strategic performance with intuitionistic fuzzy information*, Advances in Information Sciences and Service Sciences (AISS) **3** (2011), no. 11, 443–449.
-

-
- [183] J.F. Le Teno and B. Mareschal, *An interval version of PROMETHEE for the comparison of building products' design with ill-defined data on environmental quality*, European Journal of Operational Research **109** (1998), no. 2, 522–529.
- [184] H.I. Ting, L.M. Chang, and P.C. Lee, *Dynamic multi-attribute decision making model with grey number evaluations on safety management performance of subcontractors*, 2nd International Conference on Construction and Project Management (Singapore), International Proceedings of Economics Development & Research, vol. 15, IACSIT Press, 2011, pp. 55–58.
- [185] H. Tirri, *Search in vain: Challenges for internet search*, Computer **36** (2003), no. 1, 115–116.
- [186] M. Toda, *The design of a fungus-eater: A model of human behavior in an unsophisticated environment*, Behavioral Science **7** (1962), no. 2, 164–183.
- [187] R.M. Tong and P.P. Bonissone, *A linguistic approach to decisionmaking with fuzzy sets*, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics **10** (1980), no. 11, 716–723.
- [188] J. Toro, I. Requena, O. Duarte, and M. Zamorano, *A qualitative method proposal to improve environmental impact assessment*, Environmental Impact Assessment Review **43** (2013), no. 0, 9–20.
- [189] V. Torra, *Aggregation of linguistic labels when semantics is based on antonyms*, International Journal of Intelligent Systems **16** (2001), no. 4, 513–524.
- [190] ———, *Hesitant fuzzy sets*, International Journal of Intelligent Systems **25** (2010), no. 6, 529–539.
- [191] J. Townsend and J. Busemeyer, *Dynamic representation of decision making*, Bradford Bks, pp. 101–120, MIT Press, 1995.
- [192] E. Triantaphyllou, *Multi-criteria decision making methods: A comparative study*, Applied Optimization, Springer, 2000.
-

-
- [193] A. Tsadiras and K. Margaritis, *The mycin certainty factor handling function as uninorm operator and its use as a threshold function in artificial neurons*, Fuzzy Sets and Systems **93** (1998), 263–274.
- [194] I.B. Türksen, *Type 2 representation and reasoning for CWW*, Fuzzy Sets and Systems **127** (2002), no. 1, 17–36.
- [195] P. Vincke, *Basic concepts of preference modelling*, Readings in Multiple Criteria Decision Aid (C.A. Bana e Costa, ed.), Springer Berlin Heidelberg, 1990, pp. 101–118 (English).
- [196] I. Vrana and S. Aly, *Modeling heterogeneous experts' preference ratings for environmental impact assessment through a fuzzy decision making system*, Environmental Software Systems. Frameworks of eEnvironment (J. Hrebýček, G. Schimak, and R. Denzer, eds.), IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol. 359, Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 535–549.
- [197] S.P. Wan, *Some hybrid geometric aggregation operators with 2-tuple linguistic information and their applications to multi-attribute group decision making*, International Journal of Computational Intelligence Systems **6** (2013), no. 4, 750–763.
- [198] P. Wathern, *Environmental impact assessment: Theory and practice*, Routledge Chapman & Hall, 1994.
- [199] G.W. Wei, *Some geometric aggregating operator and their application to dynamic multiple attribute decision making in intuitionistic fuzzy setting*, International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems **17** (2009), no. 02, 179–196.
- [200] ———, *Some harmonic aggregation operators with 2-tuple linguistic assessment information and their application to multiple attribute group decision making*, International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems **19** (2011), no. 6, 977–998.
- [201] G.W. Wei and X.F. Zhao, *Some dependent aggregation operators with 2-tuple linguistic information and their application to multiple attribute group*
-

- decision making*, Expert Systems with Applications **39** (2012), no. 5, 5881–5886.
- [202] E.N. Weiss, *Using the analytic hierarchy process in a dynamic environment*, Mathematical Modelling **9** (1987), no. 3–5, 211 – 216.
- [203] M.M. Xia and Z.S. Xu, *Hesitant fuzzy information aggregation in decision making*, International Journal Approximate Reasoning **52** (2011), 395–407.
- [204] Y.J. Xu and Q.L. Da, *Standard and mean deviation methods for linguistic group decision making and their applications*, Expert Systems with Applications **37** (2010), no. 8, 5905 – 5912.
- [205] Z.S. Xu, *Goal programming models for obtaining the priority vector of incomplete fuzzy preference relation*, International Journal of Approximate Reasoning **36** (2004), no. 3, 261–270.
- [206] ———, *A method based on linguistic aggregation operators for group decision making with linguistic preference relations*, Information Sciences **166** (2004), no. 1–4, 19–30.
- [207] ———, *Intuitionistic preference relations and their application in group decision making*, Information Science **177** (2007), no. 11, 2363–2379.
- [208] ———, *On multi-period multi-attribute decision making*, Knowledge-Based Systems **21** (2008), no. 2, 164–171.
- [209] Z.S. Xu and R.R. Yager, *Dynamic intuitionistic fuzzy multi-attribute decision making*, International Journal of Approximate Reasoning **48** (2008), no. 1, 246 – 262.
- [210] R.R. Yager, *On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decisionmaking*, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics **18** (1988), no. 1, 183–190.
- [211] ———, *Non-numeric multi-criteria multi-person decision making*, Group Decision and Negotiation **2** (1993), no. 1, 81–93 (English).
- [212] ———, *Toward a general theory of information aggregation*, Information Science **68** (1993), no. 3, 191–206.
-

-
- [213] ———, *Aggregation operators and fuzzy systems modeling*, Fuzzy Sets and Systems **67** (1994), no. 2, 129–145.
- [214] ———, *An approach to ordinal decision making*, International Journal of Approximate Reasoning **12** (1995), no. 3–4, 237–261.
- [215] ———, *Defending against strategic manipulation in uninorm-based multi-agent decision making*, European Journal of Operational Research **141** (2002), no. 1, 217–232.
- [216] ———, *On the retranslation process in Zadeh’s paradigm of computing with words*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics **34** (2004), no. 2, 1184–1195.
- [217] ———, *Aggregation of ordinal information*, Fuzzy Optimization and Decision Making **6** (2007), no. 3, 199–219.
- [218] ———, *Concept representation and database structures in fuzzy social relational networks*, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans **40** (2010), no. 2, 413–419.
- [219] ———, *Social network database querying based on computing with words*, Flexible Approaches in Data, Information and Knowledge Management (O. Pivert and S. Zadrozny, eds.), Studies in Computational Intelligence, vol. 497, Springer International Publishing, 2014, pp. 241–257.
- [220] R.R. Yager and D.P. Filev, *Essentials of fuzzy modeling and control*, Wiley-Interscience, New York, NY, USA, 1994.
- [221] R.R. Yager and V. Kreinovich, *Decision making under interval probabilities*, International Journal of Approximate Reasoning **22** (1999), no. 3, 195–215.
- [222] R.R. Yager and A. Rybalov, *Uninorm aggregation operators*, Fuzzy Sets and Systems **80** (1996), no. 1, 111–120.
- [223] ———, *A note on the incompatibility of openness and associativity*, Fuzzy Sets and Systems **89** (1997), no. 1, 125–127.
-

-
- [224] ———, *Full reinforcement operators in aggregation techniques*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics **28** (1998), no. 6, 757–769.
- [225] ———, *Bipolar aggregation using the uninorms*, Fuzzy Optimization and Decision Making **10** (2011), no. 1, 59–70.
- [226] W. Yang, *Induced Choquet integrals of 2-tuple linguistic information*, International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems **21** (2013), no. 02, 175–200.
- [227] S. Yao, *A distance method for multi-period fuzzy multi-attribute decision making*, International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment (ICEEE), Nov 2010, pp. 1–4.
- [228] A. Yazici and R. George, *Fuzzy database modeling*, Studies in Fuzziness and Soft Computing, Physica-Verlag HD, 1999.
- [229] K. Yoon and C.L. Hwang, *Manufacturing plant location analysis by multiple attribute decision making: part i—single-plant strategy*, International Journal of Production Research **23** (1985), no. 2, 345–359.
- [230] L.A. Zadeh, *Fuzzy sets*, Information and Control **8** (1965), no. 3, 338–353.
- [231] ———, *The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I*, Information Sciences **8** (1975), no. 3, 199–249.
- [232] ———, *The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—II*, Information Sciences **8** (1975), no. 4, 301–357.
- [233] ———, *The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—III*, Information Sciences **9** (1975), no. 1, 43–80.
- [234] ———, *A computational approach to fuzzy quantifiers in natural languages*, Computer & Mathematics with Applications **9** (1983), no. 1, 149–184.
- [235] ———, *Fuzzy logic = computing with words*, IEEE Transactions on Fuzzy Systems **4** (1996), no. 2, 103–111.
-

- [236] ———, *Nacimiento y evolución de la lógica borrosa, el softcomputing y la computación con palabras: un punto de vista personal*, *Psicothema* **8** (1996), no. 2, 421–429.
 - [237] ———, *Computing with words. principal concepts and ideas*, *Studies in Fuzziness and Soft Computing*, vol. 277, Springer Berlin Heidelberg, 2012.
 - [238] G. Zhang and J. Lu, *An integrated group decision-making method dealing with fuzzy preferences for alternatives and individual judgments for selection criteria*, *Group Decision and Negotiation* **12** (2003), no. 6, 501–515.
 - [239] L. Zhang, H. Zou, and F. Yang, *A dynamic web service composition algorithm based on TOPSIS*, *Journal of Network* **6** (2011), no. 9, 1296–1304.
 - [240] Q. Zhu, H. Li, and M. Yu, *Dynamic multi-attribute decision making based on advantage retention degree*, *Journal of Information & Computational Science* **10** (2013), no. 04, 1105–1119.
-