

UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA

**INSTITUTO UNIVERSITARIO DE SISTEMAS INTELIGENTES Y
APLICACIONES NUMÉRICAS EN INGENIERÍA**



Programa de Doctorado:

Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería

Tesis Doctoral

**SISTEMA EXPERTO EN LA TOMA DE DECISIONES BASADO EN
METODOLOGÍAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL (LÓGICA DIFUSA)
PARA LA MEJORA Y OPTIMIZACIÓN DE LAS RESPUESTAS DEL
CECOES 1-1-2 ANTE FENÓMENOS METEOROLÓGICOS ADVERSOS**

El Director

El Codirector

El Autor

Dr. D. Blas José

Dr. D. Ricardo

D. Luis Juan

Galván González

Aguasca Colomo

Santacreu Ríos

Las Palmas de Gran Canaria, septiembre de 2015

**A mi padre (in memoria), a mi madre,
a mis hijos como parte de mi propio yo y a mi compañera de camino.**

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está en deuda con D. Ricardo Aguasca Colomo y D. Blas Galván González, Doctores y Profesores de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC) y guías y apoyo fundamental de esta Tesis. Sus aportaciones e impulso han permitido llegar a buen término este trabajo.

También quiero agradecer a todos aquellos que de forma sigilosa y desinteresada han aportado con sus revisiones, haciendo de esta Tesis mejor de lo que era.

A D. Carlos Rosa que aportó el orden al caos.

Y a mi compañera de camino Cande, que tanto me ha ayudado y acompañado durante todos esos momentos en los que este trabajo devoraba nuestro tiempo, por su colaboración y revisión, por sus palabras de ánimo y por su apoyo.

RESUMEN

La información que se maneja en el Centro Coordinador de Emergencias y Seguridad 1-1-2 del Gobierno de Canarias (CECOES 1-1-2), es algo más que significativa antes, durante y después de cualquier Fenómeno Meteorológico Adverso (FMA). El total de boletines de avisos y predicciones de FMA enviados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y recibidos en el CECOES 1-1-2, en cualquier FMA es considerable. La información debe ser tratada en el menor tiempo posible, con el fin de generar las prealertas y alertas correspondientes, a la vez que los avisos a la población. En resumen, se maneja mucha información y se toman muchas decisiones en un tiempo limitado.

Los Sistemas expertos basados en reglas son sistemas que pueden superar las capacidades humanas, por ejemplo, cuando se requiere analizar un gran volumen de datos en un corto lapso de tiempo, como ocurre en los servicios de emergencias.

Por otro lado la Lógica Difusa es una metodología del área de Inteligencia Artificial que es eficaz cuando se trabaja con imprecisión o ambigüedad, datos erróneos o ausencia de estos, algo a lo que los servicios de emergencias están acostumbrados. “Llueve mucho”, “lejos”, “hace mucho viento” y “poco calor” son respuestas típicas dadas por los alertantes cuando llaman al 1-1-2.

Por último, en meteorología se trabaja con conceptos imprecisos usando definiciones como posibilidad (cuando la probabilidad que ocurra un fenómeno meteorológico está entre el 10% y 40%) y probabilidad (cuando está entre el 40% y 70%).

Ante todo esto se ha desarrollado una investigación, y se han diseñado una serie de experimentos, con datos reales que permitan concluir si la toma de decisiones ante emergencias que se reciban en el CECOES 1-1-2 puede ser mejorada, en base a sistemas expertos de ayuda en la toma de decisiones basados en motores de inferencia implementados con Lógica Difusa, capaces de dar soluciones concretas ante la imprecisión o carencia de datos, dando una respuesta más rápida y eficaz.

Por lo tanto, la hipótesis de partida en esta tesis es: “El modelo actual utilizado para la toma de decisiones ante emergencias del tipo FMA, y específicamente las declaraciones

de prealertas, alertas y alertas máximas, puede ser mejorado obteniendo una respuesta más rápida y precisa”.

En el novedoso sistema experto híbrido propuesto como resultado de esta investigación se combinan:

- Métodos de Análisis de Decisión Multicriterio, como el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para extraer el conocimiento de los expertos.
- Metodologías de Inteligencia Artificial eficaces cuando se trabaja con imprecisión o ambigüedad, incertidumbre, datos erróneos o ausencia de estos, como es la Lógica Difusa.

Por último, la validación de los resultados experimentales permite concluir que:

- El modelo actual utilizado para la toma de decisiones ante emergencias del tipo FMA, y específicamente las declaraciones de prealertas, alertas y alertas máximas, puede ser mejorado obteniendo una respuesta más rápida y precisa.
- Dicha mejora, implementada a través del modelo propuesto en esta tesis, beneficia al “Sector de las Emergencias y Seguridad”, de la Comunidad Autónoma Canaria, en el servicio que prestan al ciudadano.
- El modelo propuesto combina la predicción meteorológica de la AEMET, el conocimiento de expertos locales, el Plan Nacional de Predicción y Vigilancia de Fenómenos Meteorológicos Adversos (METEOALERTA) y Planes de Protección Civil, destinados a proteger la vida y bienes de las personas en un entorno de incertidumbre, imprecisión, ambigüedad con datos erróneos o ausencia de estos. Además puede ser exportable y aplicable, parcial o totalmente, a cualquier comunidad autónoma.

ABSTRACT

The volume of information used in the Emergency Coordination Center (1-1-2 CECOES), which depends on the Canary Government, during and after any adverse weather phenomenon (FMA in Spanish) is now significantly greater than before. The amount of bulletins, warnings and forecasts about FMA sent by the Meteorological Agency (AEMET), and received at the 1-1-2 CECOES, is really considerable. The information should be treated as soon as possible in order to generate the corresponding pre-alerts and notifications, as well as public notices to the citizens. In short, the Emergency Service handles a lot of information and many decisions are taken in a very short time.

The rule-based expert systems are systems that can overcome the human capacity, for example, when required to analyze a large volume of data in a limited period of time, as in the emergency services.

Moreover, Fuzzy Logic is an artificial intelligence methodology that is effective when dealing with vagueness or ambiguity, erroneous or absence of information, something that the emergency services are used to: for example, "It rains a lot", "the storm is far away", "it is windy" and "we have low temperatures", are typical responses given by some callers when they alert 1-1-2.

Finally, Weather Forecasts usually work with imprecise concepts such as: possibility, (when the probability that a weather phenomenon occurs is between 10 and 40%) and probability, (when between 40 and 70%).

We have primarily developed an expert helping-system for decision-making based on an inference engine implemented with Fuzzy Logic in CECOES 1-1-2. This system is able to provide clear answers at the inaccuracy or lack of information, and if trained with real cases, it can improve human behavior giving a quick and effective response.

In view of this, a research has been developed, and a series of experiments have been designed with real data to support whether the decisions taken in CECOES 1-1-2, once an emergency is received, can be improved according to expert helping-systems for decision-making based on an inference engine implemented with Fuzzy Logic, These

systems are able to provide concrete solutions to the inaccuracy or lack of data, giving a more rapid and effective response.

Therefore, the hypothesis in this thesis is: "The current model used for decision making in emergencies of FMA-type, specifically pre-alert, alert or highest alert notifications, can be improved obtaining a faster and more accurate response “.

In the new hybrid expert system, proposed as a result of this research, the following elements are combined:

- Methods of Multicriteria Decision Analysis, as the Analytic Hierarchy Process (AHP) to extract knowledge from the experts.
- Artificial Intelligence Methodologies, effective when working with imprecision or ambiguity, uncertainty, erroneous data or absence of these, such as Fuzzy Logic.

Finally, the validation of experimental results supports the conclusion that:

- The current model used for decision making in emergencies of FMA-type, specifically pre-alert, alert or highest alert notifications, can be improved by obtaining a quick and accurate response.
- This improvement implemented through the proposed model in this thesis benefits the "The Emergency and Security Sector" of the Autonomous Community of Canarias, that provides this service to the citizens.
- The proposed model combines the Meteorological Agency (AEMET) weather forecasting, the knowledge of local experts, the National Plan for Prediction and Monitoring of Adverse Weather Phenomenon (METEOALERTA) and Plans of Civil Protection, to protect the life and property of people in an environment of uncertainty, vagueness, ambiguity, erroneous data or even absence of these. Besides, it can also be exportable and applicable, partly or wholly, to any autonomous community.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE FIGURAS	V
ÍNDICE DE TABLAS	VII
ACRÓNIMOS	XI
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN	1
1.2. OBJETIVOS	5
1.3. METODOLOGÍA Y CONTRIBUCIONES DE ESTA TESIS	6
1.4. PUBLICACIONES	11
1.5. ESTRUCTURA DE ESTA MEMORIA	12
2. LOS SISTEMAS EXPERTOS	17
2.1. INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS EXPERTOS	17
2.2. CAPACIDADES Y USOS DE LOS SISTEMAS EXPERTOS	18
2.3. TIPOS DE SISTEMAS EXPERTOS	19
2.4. SISTEMA EXPERTO BASADO EN REGLAS INCORPORANDO LÓGICA DIFUSA	21
2.5. ESTRUCTURA BÁSICA DE UN SISTEMA EXPERTO BASADO EN REGLAS	21
2.5.1. La base de conocimientos	22
2.5.2. Base de datos o base de hechos	22
2.5.3. El motor de inferencia	22
2.5.4. El motor de integridad	23
2.5.5. Interfaz de usuario	23
2.6. PROGRAMAS CONVECIONALES VERSUS SISTEMAS EXPERTOS....	23
2.7. DESARROLLO DE UN SISTEMA EXPERTO	24
2.8. EJEMPLOS DE SISTEMAS EXPERTOS	24
3. LA TOMA DE DECISIONES Y SELECCIÓN DE EXPERTOS	29
3.1. INTRODUCCIÓN A LA TOMA DE DECISIONES	29
3.2. CONCEPTOS BÁSICOS	29
3.2.1. Asignación de pesos	33

3.2.2.	Normalización de criterios	33
3.3.	LA TOMA DE DECISIONES MULTICRITERIO	34
3.4.	LA SELECCIÓN DE EXPERTOS	38
3.5.	RECORRIDO POR LOS PRINCIPALES MÉTODOS DE DECISIÓN MULTICRITERIO	42
3.5.1.	Introducción.....	42
3.5.2.	Las evaluaciones, la normalización y los pesos	44
3.5.3.	El Método Lexicográfico	45
3.5.4.	Métodos de relaciones de superación / sobrecalificación	46
3.5.4.1.	Relación de sobrecalificación (concordancia y discordancia).....	47
3.5.4.2.	El método ELECTRE	47
3.5.4.3.	El método PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations).....	51
3.5.5.	El método TOPSIS (Technique for Order of Preference by similarity to Ideal Solution)	51
3.5.6.	Ponderación Lineal (SCORING)	52
3.5.7.	Utilidad Multiatributo (MAUT–Multi Attribute Utility Theory)	54
3.5.8.	Proceso Analítico Jerárquico (AHP).....	54
3.5.9.	Proceso Analítico en Red (ANP)	59
3.6.	SOFTWARE PARA LA TOMA DE DECISIONES MULTICRITERIO	60
4.	LA LÓGICA DIFUSA Y LOS MODELOS HÍBRIDOS.....	67
4.1.	INTRODUCCIÓN A LA LÓGICA DIFUSA.....	67
4.2.	ESTRUCTURA BÁSICA DE UN SISTEMA EXPERTO BASADO LÓGICA DIFUSA.....	69
4.3.	MODELOS HÍBRIDOS	70
4.4.	METODOLOGÍA DE VALIDACIÓN DEL SISTEMA	71
4.4.1.	Error cuadrático medio normalizado y sesgo fraccional.....	71
4.4.2.	Test de Wilcoxon.....	71
4.5.	ESTADO DEL ARTE.....	72
5.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	81
5.1.	MODELO HÍBRIDO: SISTEMA EXPERTO EN LA TOMA DE DECISIONES BASADOS EN METODOLOGÍAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL (LÓGICA DIFUSA COMBINADA CON AHP).....	81

5.1.1.	Motivaciones para la elección del Proceso Analítico Jerárquico (AHP)	82
5.1.2.	Aplicación del Proceso Analítico Jerárquico (AHP).....	87
5.1.2.1.	La selección de expertos.....	87
5.1.2.2.	Modelar y/o descomponer el problema de decisión a resolver como una jerarquía cuyos elementos estén interrelacionados.....	93
5.1.2.3.	Desarrollar la “Matriz de Comparación por Pares” de alternativas para cada uno de los criterios y/o subcriterios.....	95
5.1.2.4.	Calculo de la consistencia de la “Matriz de Comparación por Pares”.....	98
5.1.2.5.	Calculo del Autovector.....	103
5.1.2.6.	Agregación de opiniones y/o juicios de valor del resto de expertos.	108
5.1.2.6.1.	Datos obtenidos de los diferentes expertos.....	108
5.1.2.6.2.	Agregación de las opiniones de los expertos seleccionados.....	110
5.1.2.7.	“Matriz de Comparación por Pares” de alternativas para subcriterio precipitación acumulada.....	111
5.1.2.8.	“Matriz de Comparación por Pares” de alternativas para subcriterio incremento de llamadas.....	111
5.1.2.9.	“Matriz de Comparación por Pares” de alternativas para subcriterio zona.....	112
5.1.2.9.1.	Subcriterio provincias.....	112
5.1.2.9.2.	Subcriterio islas.....	113
5.1.2.9.3.	Subcriterio zona.....	113
5.1.2.10.	Prioridades locales y globales del árbol jerárquico.....	117
5.1.2.11.	Resultados y conclusiones de la aplicación de AHP.....	120
5.1.3.	Aplicando la Lógica Difusa.....	124
5.1.3.1.	Sistema experto para la ayuda en la toma de decisiones basado en Lógica Difusa para el CECOES 1-1-2.....	124
5.1.3.2.	Definición de las variables de entrada y salida del sistema experto.	126
5.1.3.2.1.	La importancia de los solapes en las funciones de pertenencia....	134
5.1.3.2.2.	Rangos y valores lingüísticos de la variable de entrada PRECIPITACIÓN ACUMULADA.....	147
5.1.3.2.3.	Rangos y valores lingüísticos de la variable de entrada ZONA ...	148
5.1.3.2.4.	Rangos y valores lingüísticos de la variable de entrada LLAMADAS.....	149

5.1.3.2.5. Rangos y valores lingüísticos de la variable de salida DECLARACIÓN	150
5.2. VALIDACIÓN DEL SISTEMA.....	151
5.2.1. Valores del modelo actual.....	151
5.2.2. Valores observados (la realidad ocurrida).....	152
5.2.3. Valores del modelo propuesto.	153
5.2.4. Error cuadrático medio normalizado (ECMN) y sesgo fraccional (SF)	153
5.2.5. Prueba de Kolmogorov-Smirnov (KS).....	156
5.2.6. Test de Wilcoxon.....	158
6. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	165
6.1. RESULTADOS	165
6.2. CONCLUSIONES.....	169
6.3. LÍNEAS FUTURAS	170
BIBLIOGRAFÍA.....	175
ANEXO 1 - EJEMPLOS DESARROLLADOS DE DECISIÓN MULTICRITERIO. 187	
1.1. EJEMPLO DE ELECTRE I.	187
1.2. EJEMPLO DE PONDERACIÓN LINEAL (SCORING).....	195
1.3. EJEMPLO DE PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (AHP).	198
ANEXO 2 – DATOS DE EJEMPLO DE ALGUNOS ESCENARIOS OBJETO DE ANÁLISIS.....	205
2.1. FMA TRANSCURRIDO DESDE EL 29 DE ENERO AL 2 DE FEBRERO DE 2010 (LLUVIA).....	205
2.2. FMA ACAECIDO ENTRE EL 29 Y EL 31 DE ENERO DE 2011.....	228

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de flujo del método científico (elaboración propia).....	8
Figura 2: Sistema experto genérico basado en reglas (elaboración propia).	21
Figura 3: Fases de un proceso de toma de decisiones multicriterio (elaboración propia en base a [14] [15] [16]).....	37
Figura 4: Sistema experto genérico basado en un motor de inferencia en Lógica Difusa [7] [8].....	69
Figura 5: Modelo híbrido [14] [35]	70
Figura 6: .Estructura jerárquica AHP con 4 niveles (elaboración propia).....	83
Figura 7: Estructura jerárquica AHP (elaboración propia).....	94
Figura 8: Sistema experto basado en un motor de inferencia en Lógica Difusa (elaboración propia).....	126
Figura 9: Zonas de predicción meteorológica. ©Agencia Estatal de Meteorología.....	128
Figura 10: “Sistema Experto CECOES 1-1-2”(elaboración propia)	130
Figura 11: “Sistema Experto CECOES 1-1-2 con los diferentes subsistemas” (elaboración propia).....	131
Figura 12: Variable de entrada, LLAMADAS, con solapamiento inadecuado.....	136
Figura 13: Los conjuntos difusos que representan las salidas de cada regla son combinados en un único conjunto difuso.....	139
Figura 14: Variable de entrada, LLAMADAS, con solapamiento adecuado.....	140
Figura 15: Coeficiente de solape, CS (elaboración propia).....	142
Figura 16: Razón de solape, RS (elaboración propia).....	144
Figura 17: Grado de pertenencia de solape, GPS (elaboración propia).....	144
Figura 18: Variable de entrada, PRECIPITACIÓN ACUMULADA, con los conjuntos difusos asociados (MATLAB.)	148
Figura 19: Variable de entrada, ZONA, con los conjuntos difusos asociados (MATLAB).....	149
Figura 20: Variable de entrada, LLAMADAS, con los conjuntos difusos asociados (MATLAB).....	149
Figura 21: Variable de salida, DECLARACIÓN, con los conjuntos difusos asociados (MATLAB).....	150
Figura 22: Valores de salidas de ambos modelos (DECLARACIÓN) y valores observados para los escenarios de FMA 1, 2 y 3.	155

Figura 23: Nivel de significancia y gráfica obtenida con el SPSS para el modelo actual..	157
Figura 24: Modificaciones propuestas por el CECOES 1-1-2 al Plan Nacional METEOALERTA.....	167
Figura 25: Grafo ELECTRE.....	194
Figura 26: Grafo ELECTRE tras disminución umbral concordancia.....	195
Figura 27: Modelo y/o árbol jerárquico del problema.....	199

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Sistemas expertos según diferentes áreas de conocimiento [93].	25
Tabla 2: Matriz de decisión y/o valoración [20].	31
Tabla 3: Valoración del experto sobre su nivel de conocimiento.	40
Tabla 4: Puntuaciones usualmente utilizadas para la valoración de las fuentes de conocimiento de acuerdo con los diferentes autores que han desarrollado el procedimiento y/o método.	40
Tabla 5: Escala de Saaty [3].	55
Tabla 6: Tabla resumen con referencias bibliográficas sobre trabajos realizados relacionados con el método AHP.	78
Tabla 7: Autoevaluación del experto sobre el grado de conocimiento del problema.	88
Tabla 8: Encuesta tipo diseñada con el fin de valorar el grado de influencia que han tenido las diferentes fuentes de conocimiento sobre el experto.	89
Tabla 9: Encuesta tipo diseñada con el fin de valorar el grado de influencia que han tenido las diferentes fuentes de conocimiento sobre el experto (encuesta correspondiente al experto número 9).	90
Tabla 10: Encuesta realizada al experto 9 con sus correspondientes valores.	90
Tabla 11: Condiciones que deben respetar las diferentes puntuaciones sobre el grado de influencia de las diferentes fuentes de conocimiento.	91
Tabla 12: Valores obtenidos de K_c , K_a y K por los diferentes expertos.	92
Tabla 13: Matriz de comparaciones pareadas.	95
Tabla 14: Matriz de comparaciones pareadas. Elementos inversos.	95
Tabla 15: Tabla encuesta para criterios del experto 1	97
Tabla 16: Matriz de comparación por pares entre criterios para el experto 1.	97
Tabla 17: Máximo ratio de consistencia en función del rango de la matriz.	99
Tabla 18: Matriz de comparación por pares para criterios del experto 1.	100
Tabla 19: Tabla resumen normalización matriz pareada y matriz promedio experto 1.	101
Tabla 20: Índice de consistencia aleatorio en función del rango de la matriz de Saaty [3][4].	103
Tabla 21: Tabla resumen matriz de comparaciones pareadas de criterios, vectores propios y ratio de consistencia obtenida para los juicios de valor del experto 1.	106
Tabla 22: Matriz de comparaciones pareadas de criterios, vectores propios y ratio de consistencia obtenidos para los juicios de valor del experto 2.	108

Tabla 23: Matriz de comparaciones pareadas de criterios, vectores propios y ratio de consistencia obtenidos para los juicios de valor del experto 3.....	109
Tabla 24: Matriz de comparaciones pareadas de criterios, vectores propios y ratio de consistencia obtenidos para los juicios de valor del experto 4.....	109
Tabla 25: Tabla resumen de la media geométrica normalizada de los vectores propios de los diferentes expertos.....	110
Tabla 26: Vector propio que integra la opinión de los diferentes expertos.....	111
Tabla 27: Vector propio para el subcriterio precipitación acumulada.	111
Tabla 28: Vector propio para el subcriterio incremento de llamadas.....	111
Tabla 29: Vector propio para el subcriterio zona.	112
Tabla 30: Vector propio para las islas de cada provincia.....	113
Tabla 31: Matriz de comparaciones pareadas, vectores propios y ratio de consistencia obtenidos para los juicios de valor de los diferentes expertos para la isla de Tenerife.	113
Tabla 32: Matriz de comparaciones pareadas, vectores propios y ratio de consistencia obtenidos para los juicios de valor de los diferentes expertos para la isla de La Palma.	114
Tabla 33: Matriz de comparaciones pareadas, vectores propios y ratio de consistencia obtenidos para los juicios de valor de los diferentes expertos para la isla de La Gomera. .	115
Tabla 34: Matriz de comparaciones pareadas, vectores propios y ratio de consistencia obtenidos para los juicios de valor de los diferentes expertos para la isla de El Hierro.....	115
Tabla 35: Matriz de comparaciones pareadas, vectores propios y ratio de consistencia obtenidos para los juicios de valor de los diferentes expertos para la isla de Gran Canaria. .	115
Tabla 36: Valores de las diferentes prioridades locales y globales del árbol jerárquico.....	117
Tabla 37: Valores de las diferentes prioridades locales y globales del árbol jerárquico.....	122
Tabla 38.Comparación de PRECIPITACIÓN ACUMULADA con ZONA.	123
Tabla 39: Nuevos umbrales.....	124
Tabla 40: Nuevos umbrales y nuevos códigos de colores.	124
Tabla 41: Tabla umbrales y niveles de aviso AEMET (fuente METEOALERTA [2]).....	129
Tabla 42: Resumen reglas difusas con sus grados de pertenencia para un solape inadecuado.	138
Tabla 43: Resumen reglas difusas con sus grados de pertenencia para un solape adecuado.	140
Tabla 44: Calculo de los valores del centroide.	141
Tabla 45: Tabla resumen con los valores de MSSVD, MSSVI, GRS, CS y RS de las diferentes funciones de pertenencia.....	145

Tabla 46: Variable de entrada PRECIPITACIÓN ACUMULADA, con prioridades globales (ver tabla 37) como valores centrales de las funciones de pertenencia.	147
Tabla 47: Variable de entrada ZONA, con prioridades globales (ver tabla 37) como valores centrales de las funciones de pertenencia.	148
Tabla 48: Variable de entrada LLAMADAS, con prioridades globales como valores centrales de las funciones de pertenencia.	149
Tabla 49: Variable de salida DECLARACIÓN. Los valores centrales de las funciones de pertenencia se deducen de la tabla 40.	150
Tabla 50: Valores de salidas de ambos modelos (DECLARACIÓN) y valores observados para los escenarios de FMA 1, 2 y 3.	154
Tabla 51: Valores ECMN y SF para el modelo actual y el propuesto.	155
Tabla 52: Valores obtenidos en el SPSS para la significancia en los diferentes modelos. .	157
Tabla 53: Valores obtenidos de los diferentes modelos.	159
Tabla 54: Cálculo de valores para el modelo actual (Wilcoxon).	159
Tabla 55: Cálculo de valores para el modelo propuesto (Wilcoxon).	160
Tabla 56: Valores de W^+ y W^-	161
Tabla 57: Zonas con ponderaciones tras aplicar AHP. Extracto de la tabla 37.	166
Tabla 58: Tabla umbrales y niveles de aviso AEMET con modificaciones (fuente METEOALERTA [2])	168
Tabla 59: Datos del problema.	187
Tabla 60: Criterios.	188
Tabla 61: Matriz de decisiones.	188
Tabla 62: Matriz de índices de concordancia.	189
Tabla 63: Matriz de decisiones normalizada.	190
Tabla 64: Matriz de decisiones normalizada y ponderada.	190
Tabla 65: Matriz de índices de discordancia.	191
Tabla 66: Matriz de dominancia concordante.	192
Tabla 67: Matriz de dominancia discordante.	193
Tabla 68: Matriz de dominancia agregada.	193
Tabla 69: Escala ponderación de criterios.	196
Tabla 70: Ponderación de criterios.	197
Tabla 71: Escala ponderación de alternativas con respecto a los criterios.	197
Tabla 72: Ponderación de alternativas con respecto a los criterios.	197
Tabla 73: Tabla con preferencias finales de las alternativas (solución).	198

Tabla 74: Matriz de comparación pareada para los criterios.	200
Tabla 75: Matriz de comparación pareada para los criterios con sus correspondientes vectores propios normalizados que establecen el orden de prioridades para el decisor.....	201
Tabla 76: Matriz de comparación pareada para las alternativas con respecto al criterio coste con sus correspondientes vectores propios normalizados que establecen el orden de prioridades para el decisor.....	201
Tabla 77: Matriz de comparación pareada para las alternativas con respecto al criterio confiabilidad con sus correspondientes vectores propios normalizados que establecen el orden de prioridades para el decisor.	201
Tabla 78: Matriz de comparación pareada para las alternativas con respecto al criterio plazo de entrega con sus correspondientes vectores propios normalizados que establecen el orden de prioridades para el decisor.....	202

ACRÓNIMOS

AEMET	Agencia Estatal de Meteorología.
AHP	Proceso Analítico Jerárquico o Analytic Hierarchy Process.
ANP	Proceso Analítico en Red o Analytical Network Process.
CECOES 1-1-2	Centro Coordinador de Seguridad y Emergencias del Gobierno de Canarias.
CI	Índice de Consistencia.
CR	Ratio de Consistencia.
CS	Coefficiente de solape.
DGSE	Dirección General de Seguridad y Emergencias.
ECMN	Error Cuadrático Medio Normalizado.
ELECTRE	ELimination Et Choix Traduisant la REalité.
FMA	Fenómeno Meteorológico Adverso.
GRS	Grado relativo de solape.
INFOCA	Plan Especial de Protección Civil y Atención de Emergencias por Incendios Forestales de la Comunidad Autónoma de Canarias.
INFOMA	Plan de Protección Civil de Emergencia por Incendios Forestales en la Comunidad de Madrid.
INR	Incidente No Rutinario.
INUNMUR	Plan Especial de Protección Civil ante Riesgo de Inundaciones de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.
KS	Prueba de Kolmogorov-Smirnov.
MADM	MultiAttribute Decision Making.
MAUT	Utilidad Multiatributo o MULTI ATTRIBUTE UTILITY THEORY.
METEOALERTA	Plan Nacional de Predicción y Vigilancia de Fenómenos Meteorológicos Adversos.
MSSVD	Mínimo solape con la función adyacente lateral derecha para salida válida.
MSSVI	Mínimo solape con la función adyacente lateral izquierda para salida válida.
PECMAR	Plan específico de contingencias por contaminación marina accidental de Canarias.

PEFMA	Plan Específico de Protección Civil y Atención de Emergencias de la Comunidad Autónoma de Canarias por riesgos de Fenómenos Meteorológicos Adversos.
PROMETHEE	Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation.
RS	Razón de solape.
SF	Sesgo Fraccional.
TOPSIS	Technique for Order of Preference by similarity to Ideal Solution.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN

“Os acordáis de Santa Bárbara sólo cuando truena”. Y, cuando truena, es decir cuando ocurre el desastre, bien poco podemos hacer ya: atender a las víctimas, salvar lo que se pueda, desescombrar, enterrar a los muertos, recuperar la normalidad, tramitar los seguros y, llegado el caso, imputar responsabilidades.

Jaume Curbet. Analista

Los Planes de Protección Civil son instrumentos que utilizan las distintas Administraciones para atender las emergencias. En estos documentos se establecen los riesgos potenciales así como la coordinación de los recursos humanos y materiales frente a una situación de emergencia y la intervención necesaria para garantizar la protección de la vida y los bienes de las personas. En España cada Comunidad Autónoma desarrolla y pone nombre sus “*planes de emergencia*”, en esencia Planes de Protección Civil, atendiendo a sus características específicas.

Existen planes para diferentes tipos de emergencias, entre otros cabe citar: Plan Específico de Protección Civil y Atención de Emergencias de la Comunidad Autónoma de Canarias por riesgos de Fenómenos Meteorológicos Adversos (PEFMA), Plan Especial de Protección Civil y Atención de Emergencias por Incendios Forestales de la Comunidad Autónoma de Canarias (INFOCA), Plan específico de contingencias por contaminación marina accidentada de Canarias (PECMAR), Plan de Protección Civil de Emergencia por Incendios Forestales en la Comunidad de Madrid (INFOMA), Plan Especial de Protección Civil ante Riesgo de Inundaciones de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia (INUNMUR), etc.

Se considera Fenómeno Meteorológico Adverso (FMA) a todo episodio atmosférico capaz de producir, directa o indirectamente, daños a las personas o menoscabos materiales de consideración. En consecuencia, pueden resultar adversos aquellos episodios meteorológicos en los que algunas variables alcanzan valores extremos (definidas en METEOALERTA y cuyos avisos llegan a través de la AEMET).

Las Comunidades Autónomas en España tratan los FMA según las especificidades de sus Planes de Protección Civil y salvo las que tienen agencia propia para la predicción meteorológica (Agencia Vasca de Meteorología), todas trabajan con la información facilitada por la AEMET y con conjuntos de expertos. Esto hace que todas traten los FMA con bastantes similitudes y que los problemas que surgen tengan múltiples coincidencias. Por ello en esta investigación se ha utilizado el caso de Canarias ejemplo representativo de esta clase de planes y su problemática asociada.

En Canarias, el Plan Especial sobre Fenómenos Meteorológicos Adversos, PEFMA (en otras comunidades autónomas se denominan de diferente forma aunque se refieren a lo mismo) es un Plan de Protección Civil. Desde final de los años 90, la toma de decisiones ante un FMA en Canarias ha seguido las siguientes fases:

1. La información facilitada por la AEMET ante la detección de un FMA, recibida en el CECOES 1-1-2, se pone en conocimiento de la Dirección General de Seguridad y Emergencias del Gobierno de Canarias (DGSE), como órgano competente en las declaraciones de prealerta, alerta o alerta máxima.
2. En base al análisis de la información recibida y en aplicación del PEFMA [1], la DGSE realiza la declaración de prealerta, alerta o alerta máxima. En el tratamiento de la información influye la cantidad recibida, como ha sido transmitida a través de los diferentes canales y si ha sido influenciada en el proceso, la experiencia previa de los decisores, el tiempo disponible para tomar la decisión, etc.
3. La declaración es notificada al CECOES 1-1-2 que realiza los comunicados a las administraciones, organismos, servicios operativos y empresas involucradas en la operatividad del PEFMA, además de los avisos a la población en caso necesario. Cuando se recibe información adicional o datos reales, cuando el FMA está en curso, puede cambiar la declaración y se repite el proceso desde la fase 1.

Los problemas que surgen son:

1. El proceso está influenciado por el conjunto de expertos involucrado en la toma de decisiones, que no siempre es el mismo ya que al tratarse de un servicio que funciona las 24 horas al día, los 365 días al año, el personal rota según los turnos de trabajo.

2. Se trabaja con imprecisión, ambigüedad, datos erróneos o ausencia de estos y expresiones de personas, incluso en distintos idiomas. Además, en meteorología se trabaja con conceptos imprecisos y las predicciones meteorológicas se realizan utilizando modelos matemáticos que no siempre se cumplen. Por otro lado, la singularidad de la geografía de Canarias, lo que se conoce como “*efectos locales*”, no es tenida en cuenta por los modelos utilizados pero si se encuentra en el conocimiento de los expertos.
3. Se maneja mucha información y se toman múltiples decisiones, que afectan a la vida y los bienes de las personas, en un tiempo limitado. La información debe ser tratada en el menor tiempo posible para generar las prealertas, alertas y alertas máximas, así como los comunicados y avisos a la población.

En las diferentes Comunidades Autónomas el problema se suele abordar sin el uso de metodologías de última generación de ayuda a la toma de decisiones, empleando el método clásico de reunir la información, debatir con los expertos y adoptar decisiones.

Dado el avance de la tecnología en todas sus dimensiones, y la complejidad creciente de los retos a abordar, la utilización de los avances tecnológicos de investigación y desarrollo en la gestión de la seguridad y emergencias resulta hoy en día prácticamente imprescindible. Por ello y tras un análisis previo, cuyos resultados concuerdan con las opiniones debatidas con los expertos, es posible identificar la Inteligencia Artificial como el conjunto de metodologías a priori más importantes para modernizar los procesos de toma de decisiones mencionados. En concreto, por las similitudes entre el problema planteado y las diferentes metodologías, se puede establecer que tanto los Sistemas Expertos como la Lógica Difusa son de especial interés y por ello se abordan en esta investigación.

Los sistemas expertos refunden en un programa informático el conocimiento de expertos en una materia. Están diseñados para servir de soporte a los complejos análisis que se requieren con el fin de tomar decisiones eficientes y rápidas y pueden superar fácilmente determinadas capacidades del ser humano. Existe una extensa bibliografía sobre la aplicación de sistemas expertos basados en reglas, métodos de análisis de decisión multicriterio discreta y metodologías de inteligencia artificial, como por ejemplo la Lógica Difusa, en multitud de campos profesionales. Sin embargo, en el

sector de la Seguridad y Emergencias y para el tema que se trata se reduce notablemente (ver [45] [46] [47] en tabla 5).

Como hipótesis de partida en esta tesis se propone que “El modelo actual utilizado para la toma de decisiones ante emergencias del tipo FMA, y específicamente las declaraciones de prealertas, alertas y alertas máximas, puede ser mejorado obteniendo una respuesta más rápida y precisa”.

Los métodos clásicos [3] [13] [33] de decisión multicriterio se basan en buscar un conjunto de alternativas o decisiones posibles al problema que se plantea: búsqueda del mejor candidato para un puesto de trabajo, de la mejor inversión, etc. Para problemas como el de esta tesis, resultan poco eficientes y eficaces y es difícil llegar a la alternativa ideal con la utilización de uno solo de estos métodos, por lo que es necesario combinarlos. Entre otras deficiencias cabe citar:

Éstos permiten abordar de forma sistemática y ordenada los problemas de decisión simples pero con problemas complejos, por ejemplo cuando se trabaja con imprecisión o ambigüedad y criterios cuantitativos y cualitativos [14] no permiten dar una solución al problema que se plantea. Surgen entonces métodos que combinan la fortaleza de cada uno de ellos, como por ejemplo Fuzzy TOPSIS o Fuzzy AHP [11].

Sin embargo existen problemas de decisión multicriterio, como el que se plantea en esta tesis, que aún con estos métodos no consiguen ser los suficientemente eficientes y eficaces.

Por todo ello es importante explorar nuevas alternativas que incluyen tanto la búsqueda de nuevos métodos como la combinación de los existentes (hibridación), para identificar mejores metodologías de ayuda a la toma de decisiones. Las mejoras deseables son muchas pero entre ellas cabe destacar:

- Tener una solución o conjunto de soluciones, en el menor tiempo posible, donde el tomador de decisiones pueda elegir. Para ello juega un papel importante la eficiencia del método, entendiéndose como la capacidad para dar una solución o conjunto de soluciones esperables en el menor tiempo posible. Es importante la simplicidad en el diseño que consumirá menos recursos de proceso y dará una solución más rápida.

- Tener una solución o conjunto de soluciones esperables que mejoren el modelo actual. Para ello juega un papel importante la eficacia del método, entendiéndose como el grado de cumplimiento de los objetivos previstos en su diseño. Para el caso de estudio llegar a la solución o conjunto de soluciones ideales.

1.2. OBJETIVOS

Se ha comentado en el apartado anterior, y se detallará en la posterior revisión del estado del arte, que los métodos clásicos resultan poco eficaces y eficientes en problemas de decisión como el que se trata: *Mejorar y optimizar las respuestas de los centros de control de emergencias tipo 1-1-2 ante las funciones a desarrollar en los planes de emergencia por Fenómenos Meteorológicos Adversos*. Por ello esta tesis trata de contribuir al objetivo general de explorar la utilización de métodos híbridos que combinen las ventajas de diferentes métodos, tanto clásicos como novedosos, para mejorar la eficacia y eficiencia de tales problemas de decisión.

Para ellos se plantean una serie de objetivos específicos que permitan desarrollar ordenadamente la investigación a realizar, estos esencialmente son:

- Explorar el estado del arte de las metodologías existentes y diferenciar en cada una de ellas aquellas características que se consideren positivas como contribución a una posible nueva metodología. En concreto se realizará una revisión de los Sistemas Expertos, la Lógica Difusa y los métodos de ayuda a la Toma de Decisiones Multicriterio. Asimismo se analizarán antecedentes de metodologías híbridas como base de partida para definir nuevas propuestas.
- Definir una metodología capaz de combinar (hibridar) las características positivas identificadas y aplicarla para obtener una o varias nuevas propuestas metodológicas. Analizar conceptualmente la o las nuevas propuestas para establecer su marco teórico de validez y su aplicabilidad.
- Diseñar un conjunto de experimentos que permitan aplicando el método científico constatar las características de la o las nuevas metodologías propuestas. Realizar los experimentos, analizar los resultados y obtener conclusiones con base científica.
- Establecer una serie de recomendaciones que permitan aplicar de forma eficiente la o las nuevas metodologías en los diferentes centros de control de emergencia tipo 1-1-2.

- Definir posibles líneas futuras de mejora de la o las nuevas metodologías propuestas como guía para posteriores trabajos de investigación.

1.3. METODOLOGÍA Y CONTRIBUCIONES DE ESTA TESIS

Podemos definir el método científico como el conjunto de pasos necesarios para obtener conocimientos válidos mediante instrumentos confiables y dar respuesta a los interrogantes. El método intenta prevenir de la subjetividad y se basa en la reproducibilidad, que es la capacidad de poder repetir un determinado experimento en cualquier lugar y por cualquier persona.

Para el caso que nos ocupa, el método debe poder ser reproducido en cualquier Comunidad Autónoma, evidentemente con las características propias de cada una de ellas, ya que el problema planteado y que intentamos resolver, se da en mayor o menor medida en toda España.

En líneas generales (y con pequeños matices sobre la definición de Francis Bacon), las partes que conforman nuestro método científico son:

1. La observación: aplicar atentamente los sentidos a un fenómeno para estudiarlo.
 - a. El diseño de la investigación, el análisis y la búsqueda de los datos necesarios.
 - b. Entrevistas con los expertos (meteorólogos y analistas de base de datos).
 - c. La comprobación de la fiabilidad de las fuentes.
2. La inducción: extraer, a partir de determinadas observaciones o experiencias, el principio particular de cada una de ellas.
 - a. Entrevistas con los expertos (meteorólogos y analistas de base de datos).
3. El planteamiento de las hipótesis.
4. La demostración o refutación de las hipótesis
5. La presentación de la tesis.

Aunque es importante saber que ningún método es un camino infalible para la obtención del conocimiento, todos ayudan. Se utilizará mayoritariamente, además de otros (por

ejemplo analogía, consistente en inferir de la semejanza de algunas características entre dos objetos, la probabilidad de que las características restantes sean también semejantes), el método inductivo.

La inducción es un modo de razonar que lleva de lo particular a lo general. Inducir es ir más allá de lo evidente. El método inductivo es aquel que establece proposiciones de carácter general obtenidas de la observación y análisis de conductas particulares.

Se asociaran ciertos fenómenos, separados en el tiempo. Por ejemplo, dentro de un periodo temporal se elegirán escenarios de FMAs acaecidos en el Archipiélago Canario, cuyas características especiales y consecuencias fueron de especial relevancia.

Por medio del razonamiento inductivo, se intentará descubrir el denominador común que los asocia. Por ejemplo, en los escenarios seleccionados si la predicción meteorológica se alejaba en determinado grado de la realidad de la Protección Civil y Atención de Emergencias y se declaraban o mantenían alertas cuando tenían que ser prealertas.

Este denominador común servirá también para generar hipótesis. Por ejemplo, la predicción meteorológica se está alejando de la realidad final de Protección Civil y Atención de Emergencias o es necesario modificar los umbrales y niveles de aviso (amarillo, naranja y rojo).

Planteada la hipótesis, deduciremos sus consecuencias con respecto a los fenómenos considerados. Haremos investigaciones, para el caso que nos ocupa, teóricas ya que no se puede repetir un Fenómeno Meteorológico Adverso para observar si las consecuencias de las hipótesis son verificadas por los hechos. El modo de verificar la hipótesis será mediante simulación de FMAs ya sucedidos, de los cuales se conocen las consecuencias que tuvieron.

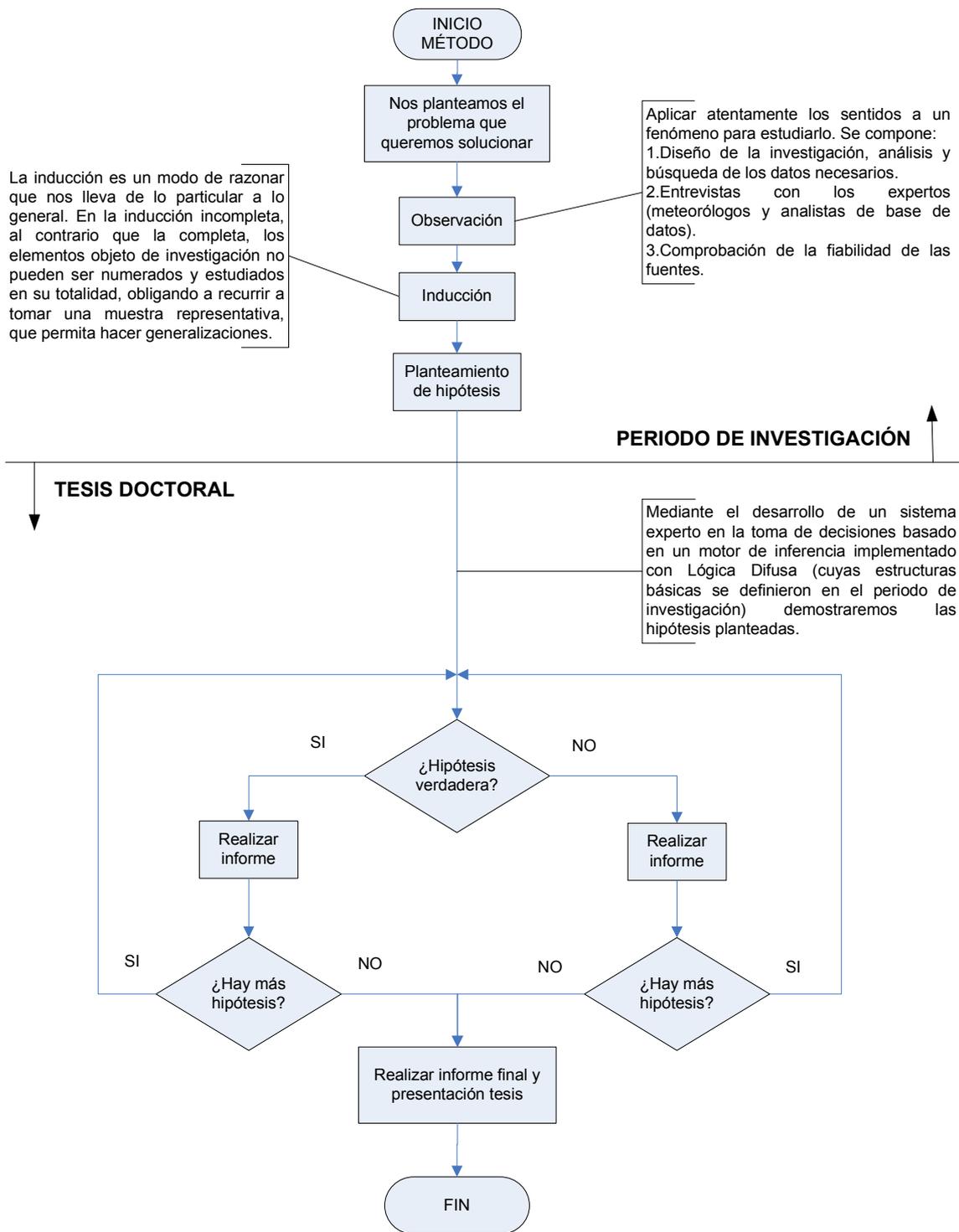


Figura 1: Diagrama de flujo del método científico (elaboración propia).

En cuanto a la elección de las diferentes metodologías con las que se trabaja en esta tesis, y aunque en capítulos posteriores se detallan los motivos, es importante tener en cuenta que ha primado:

- Su simplicidad y claridad, permitiendo estructurar el problema de forma visual, lo que facilita su comprensión. Las metodologías elegidas se acercan bastante a la comprensión de la mente humana, ya que permiten extraer el conocimiento de los expertos mediante preguntas fáciles de comprender y responder y es importante tener en cuenta que la base de conocimiento es la parte más importante del sistema experto.
- Su comportamiento de manera eficaz con la evaluación de criterios subjetivos con posibles contradicciones entre expertos, sin incitar ni obligar al consenso, permitiendo agregar las diferentes opiniones.
- Su facilidad para replantear y ajustar los juicios de valor o preferencias de los expertos, repitiendo el proceso y midiendo las inconsistencias de los juicios.
- Su eficacia cuando para trabajar con imprecisión o ambigüedad, datos erróneos o ausencia de estos, algo a lo que los servicios de emergencias están acostumbrados. “Llueve mucho” y “hace mucho viento” son respuestas típicas dadas por los alertantes a los Centros 1-1-2.

Se propone la utilización de métodos híbridos donde se combinan las ventajas que puedan aportar cada uno de ellos por separado. Por lo tanto, se plantea un sistema en el que se combina AHP y Lógica Difusa. Una actividad de I+D+i que persigue mejorar y optimizar las respuestas del CECOES 1-1-2 ante riesgo por FMA.

Esta tesis contribuye, con una metodología novedosa, combinando la predicción meteorológica de la AEMET, el conocimiento de expertos locales, METEOALERTA y Planes de Protección Civil, destinados a proteger la vida y bienes de las personas en un entorno de incertidumbre, imprecisión, ambigüedad con datos erróneos o ausencia de estos para dar respuesta a los riesgos del tipo FMA.

Otra de las contribuciones es el diseño de una metodología que marca las pautas para abordar este tipo de problemas. Metodología exportable a otros problemas similares como es el caso del INFOCA, PECMAR, INFOMA, INUNMUR, etc.

La metodología se basa en:

1. Seleccionar a un conjunto de expertos (ver 5.1.2.1), especialistas en seguridad y emergencias con un alto grado de conocimiento en el PEFMA y FMA. Para la selección se aplica el “Coeficiente de Competencia Experta” o “Coeficiente K” [50] [51].
2. Utilizar el método AHP, propuesto por Saaty [3] [4], para recoger el conocimiento de los expertos, dando consistencia a los juicios a la vez de soporte matemático. Se genera una base de conocimientos y se evita que la toma de decisiones pierda objetividad porque venga influenciada por el conjunto de expertos que se encuentre de turno. Además, se puede introducir nuevo conocimiento y se evita que desaparezca cuando los expertos se jubilan o dejan de trabajar en el sector. Por último, AHP está cerca de un lenguaje Fuzzy por lo que es ideal para trabajar con la Lógica Difusa.
3. Utilizar la Lógica Difusa para trabajar con la imprecisión o ambigüedad, datos erróneos o ausencia de estos y poder comprender y funcionar con las expresiones de los seres humanos. Se construyen funciones de pertenencia para poder evaluar las alternativas posibles en cada momento (declaraciones de prealerta, alerta o alerta máxima). El grado de pertenencia a determinada función es lo que el sistema utilizará para proponer la alternativa idónea.
4. Variar la tradicional metodología AHP Fuzzy [11] para simplificar los cálculos con los conjuntos difusos y aplicar AHP para después fusificar. Primero se aplica AHP y obteniéndose la base de conocimiento después se fusifica ese conocimiento para utilizarlo en el sistema experto basado en Lógica Difusa, para finalmente obtener la alternativa ideal (declaración: prealerta, alerta o alerta máxima). AHP se desarrolla para obtener prioridades locales y globales de criterios y subcriterios y con la Lógica Difusa se obtiene la solución final, lo que habitualmente se consigue con el cálculo de las prioridades totales en AHP.
5. Gestionar la gran cantidad de información en un corto lapso de tiempo, automatizando todo el proceso mediante un sistema experto basado en reglas [57], en el que la base de conocimiento ha sido generada mediante AHP y el motor de inferencia se basa en Lógica Difusa [58]. Además el sistema experto tiene que tener

un comportamiento dinámico, es decir, se tiene que actualizar con los nuevos datos que surjan que pueden provocar un cambio en la respuesta.

El reto de este trabajo ha sido investigar el método más adecuado para desarrollar un sistema que permita seleccionar la mejor alternativa ante el riesgo por FMA en el más corto lapso de tiempo, es decir, la declaración (prealerta, alerta o alerta máxima) que mejor se corresponda con la situación que se esté viviendo. Además, establecer un protocolo que permita la selección de forma dinámica, es decir, la elección de la respuesta en función de nuevos datos de la evolución del fenómeno meteorológico y de los daños causados a las personas y sus bienes.

De este modo se plantea un sistema híbrido en el que se utiliza AHP para extraer el conocimiento de un grupo de expertos y la Lógica Difusa para la evaluación y tratamiento de las diferentes soluciones del problema.

En definitiva, se propone desarrollar una actividad de I+D+i encaminada a mejorar y optimizar las respuestas del CECOES 1-1-2 ante las funciones a desarrollar en el PEFMA, con la ayuda de un sistema experto en la toma de decisiones, basado en la propuesta de un modelo híbrido en el que se combinan:

- Métodos de Análisis de Decisión Multicriterio, como AHP.
- Metodologías de Inteligencia Artificial eficaces cuando se trabaja con imprecisión o ambigüedad, incertidumbre, datos erróneos o ausencia de estos, como es la Lógica Difusa

1.4. PUBLICACIONES

Algunas de las contribuciones de esta tesis han sido publicadas en un libro y en una revista científica. Además han sido presentadas en congresos y jornadas:

- Santacreu Ríos LJ, Talavera Ortiz A, Aguasca Colomo R, Galván González B. “1-1-2 Canarias y los Sistemas Expertos para la toma de decisiones en caso de Fenómenos Meteorológicos Adversos”. En: Congreso de Emergencias Candelaria Protege. Tenerife 2010.

- Santacreu Ríos LJ, Talavera Ortiz A, Aguasca Colomo R, Galván González B. “Sistemas Expertos para la ayuda a la toma de decisiones en caso de Fenómenos Meteorológicos Adversos”. En: Jornadas internacionales de coordinación en protección civil: de la formación a la respuesta integral. Las Palmas de Gran Canaria 2010.
- Santacreu Ríos LJ, Talavera Ortiz A, Aguasca Colomo R, Galván González B. “El 1-1-2, los Sistemas Expertos y la Seguridad Vial en Canarias”. En: II Jornadas de Seguridad Vial en Canarias: Aspectos Técnicos, Médicos y Jurídicos. Las Palmas de Gran Canaria 2012.
- Santacreu Ríos LJ. “Implementación de reglas en la toma de decisiones en incendio forestal. Reglas básicas de razonamiento que imitan el comportamiento de los Expertos, motor de inferencia basado en Lógica Difusa”.1ª edición. Alemania: Editorial Académica Española, 2014. 80 p. ISBN 978-3-659-00836-8
- Santacreu Ríos LJ, Talavera Ortiz A, Aguasca Colomo R, Galván González B. "EXPERT SYSTEM FOR DECISIONS-MAKING BASED ON FUZZY LOGIC AND AHP TO ADVERSE WEATHER". DYNA. Septiembre-Octubre 2015. Vol.90, N°5. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7469>

1.5. ESTRUCTURA DE ESTA MEMORIA

Esta memoria está estructurada de la siguiente forma:

Capítulo 1: Se realiza una introducción para explicar el ámbito en el que se desarrolla el presente trabajo y para entender y valorar mejor las soluciones dadas a los problemas que se plantean.

Capítulo 2: Se realiza una revisión del estado del arte de los Sistemas Expertos, describiendo una estructura básica de un sistema experto basado en reglas.

Capítulo 3: Se analizan los principales métodos de decisión multicriterio adaptados al ámbito de la Seguridad y Emergencias (anexo I). Estos ejemplos ayudaron a valorar la elección del método de análisis multicriterio idóneo para la resolución del problema planteado en esta tesis.

Capítulo 4: Se realiza una introducción a la Lógica Difusa, a una estructura básica de un “Sistema Experto basado en Lógica Difusa” y al concepto de modelo híbrido. Además, se efectúa una revisión del estado del arte que comprende una bibliografía muy extensa. Se ha prestado especial interés a las aportaciones importantes, las novedosas y las relevantes para los objetivos de esta tesis.

Capítulo 5: Se desarrolla como aportación de esta tesis la concepción, el diseño, la construcción y la validación de un sistema híbrido que da solución a los problemas planteados. Se aplican las metodologías consideradas y justificadas como idóneas y se implementa un sistema experto para la ayuda en la toma de decisiones combinando la Lógica Difusa y el Proceso Analítico Jerárquico (AHP). Finalmente se valida la experimentación del sistema con dos estadísticos y el “Test de Wilcoxon”.

Capítulo 6: Se presentan los resultados, conclusiones, un resumen de las aportaciones de la tesis y líneas futuras. Además se explica lo novedoso del sistema planteado y como se han modificado las metodologías tradicionales en la búsqueda de soluciones eficientes a los problemas planteados.

Anexo I: Contiene ejemplos prácticos desarrollados y adaptados al ámbito de la Seguridad y Emergencias que ayudaron a valorar la elección del método de análisis multicriterio idóneo para la resolución del problema planteado en esta tesis.

Anexo II: Contiene información recabada de dos de los escenarios elegidos de FMA para el análisis y simulación del sistema experto desarrollado.

CAPÍTULO 2

LOS SISTEMAS EXPERTOS

2. LOS SISTEMAS EXPERTOS

2.1. INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS EXPERTOS

Los primeros sistemas expertos, desarrollados en los años 60, eran capaces de resolver problemas simples. Siendo a principios de los años 70 cuando estos sistemas empiezan a resolver problemas de mayor complejidad, basándose en situaciones inciertas y medidas difusas al principio y redes probabilísticas después [52] [90].

Edward Feigenbaum, conocido también como “El Padre de los Sistemas Expertos”, comenzó a desarrollar sistemas expertos utilizando bases de conocimiento definidas de forma minuciosa. En 1967, junto con otros programadores de la Universidad de Stanford, construye DENDRAL [92], considerado como el primero de los sistemas expertos, utilizado para la identificación de estructuras químicas moleculares

Edward Shortliffe [89], a principios de los años 70, desarrolla MYCIN un sistema experto cuya función principal era el diagnóstico de enfermedades infecciosas de la sangre, siendo uno de los primeros sistemas expertos de diagnóstico de enfermedades en medicina.

Funcionaba con una base de conocimientos de unas seiscientas reglas aproximadamente. El usuario respondía “sí” o “no” a una serie de preguntas que al final daba un listado de bacterias posibles, que iban de un rango de mayor a menor en la probabilidad del diagnóstico.

A partir de los años 80 toman mayor importancia los sistemas expertos y las empresas de tecnología investigan en esta área, siendo a partir de los años 90, con el desarrollo de la informática, cuando la Inteligencia Artificial y los sistemas expertos reciben un importante impulso.

Una de las conclusiones más importantes es que el éxito de un sistema experto depende casi en exclusividad de la calidad de la base de conocimientos, con la problemática que subyace en la codificación del conocimiento experto.

La base de conocimientos, para el caso de estudio, se obtendrá a través de “Métodos de Decisión Multicriterio” que se verá posteriormente.

Actualmente los sistemas expertos son una de las ramas de la Inteligencia Artificial [88] más usadas y combinan en un programa informático el conocimiento de expertos en una materia, de ahí su nombre.

2.2. CAPACIDADES Y USOS DE LOS SISTEMAS EXPERTOS

Los sistemas expertos pueden:

- Resolver problemas muy difíciles y funcionar con datos que contienen errores, usando reglas inciertas de enjuiciamiento.
- Contemplar múltiples hipótesis en competición simultánea.
- Explicar el proceso de razonamiento utilizado y justificar las conclusiones.

Estos sistemas están diseñados para servir de soporte a los complejos análisis que se requieren con el fin de tomar decisiones eficientes y oportunas a tiempo.

Los sistemas expertos pueden superar la capacidad de síntesis humana, por ejemplo, cuando se requiere analizar un gran volumen de datos en un corto lapso de tiempo, como ocurre en los Centros de Coordinación Operativa (CECOES 1-1-2).

El experto humano se verá obligado a despreciar parte de la información, desechando la que no considere relevante, o a tomar decisiones en presencia de cierto grado de desconocimiento. Sin embargo, el sistema experto, dada su mayor velocidad de proceso, puede analizar toda la información, sin que aparezca fatiga u otros efectos propios del ser humano que empeoran los resultados.

Estos sistemas, convenientemente contruidos, pueden también superar al experto humano cuando la decisión exige aplicar conocimientos de varios campos.

Los sistemas expertos se usan cuando [52]:

- Se precisa que personal con escasa experiencia pueda solucionar problemas que requieren el conocimiento de uno o varios expertos.
- Se requiere aumentar el número de personas con acceso al conocimiento.
- Se necesita integrar el conocimiento de varios expertos, lo que da lugar a sistemas de mayor fiabilidad.

- Se exige resolver problemas y responder a preguntas más rápidamente que un experto. Por lo tanto, son vitales en los casos en los que el tiempo de respuesta es crítico.
- La complejidad del problema imposibilita resolver el problema al experto o la solución dada por éste no es fiable. Debido a la capacidad de los ordenadores para procesar un elevadísimo número de operaciones complejas de forma rápida, los sistemas expertos proporcionan respuestas rápidas y fiables en situaciones en las que los expertos no pueden.
- Se necesita realizar operaciones monótonas, aburridas e incómodas para los humanos. Puede ser la solución en situaciones en la que la tarea a realizar desborda al ser humano (por ejemplo, un avión).
- Se persigue obtener ahorros.

El uso de los sistemas expertos es recomendable cuando [52]:

- El conocimiento es complejo de adquirir o se basa en reglas que sólo pueden ser asimiladas de la experiencia.
- La actualización y mejora continua del conocimiento es esencial.
- El problema está sujeto a reglas o códigos cambiantes.
- Los servicios de los expertos humanos son caros o difíciles de encontrar.
- El conocimiento de los usuarios sobre la temática tratada es limitado.

2.3. TIPOS DE SISTEMAS EXPERTOS

Los problemas con los que pueden tratar los sistemas expertos pueden clasificarse en dos tipos [52] [59]:

- Deterministas.
- Estocásticos.

En Matemáticas y Física a un sistema se le denomina determinista cuando el azar no interviene en los futuros estados del sistema. Siempre originará la misma salida si las condiciones de partida o el estado inicial son las mismas.

Sin embargo, en los estocásticos o aleatorios los estados futuros no están determinados por los anteriores.

Los problemas con tipología determinista pueden ser enunciados usando un conjunto de reglas que relacionen varios objetos apropiadamente definidos. Los sistemas expertos que tratan este tipo de problemas son denominados sistemas basados en reglas, ya que sus soluciones se alcanzan basándose en un conjunto de reglas con un mecanismo de razonamiento lógico.

En situaciones inciertas se hace necesario introducir medios que traten la incertidumbre.

Por otro lado, algunos sistemas expertos usan la misma estructura de los sistemas basados en reglas introduciendo una medida asociada a la incertidumbre de las reglas y a la de sus premisas. Un ejemplo es la Lógica Difusa.

Otra medida de incertidumbre es la probabilidad, en la que se extraen conclusiones usando formulas conocidas de la teoría de la probabilidad.

Los sistemas expertos que utilizan la probabilidad como medida de incertidumbre se conocen como sistemas expertos probabilísticos y la estrategia de razonamiento usada se denomina razonamiento probabilístico o inferencia probabilística. Como ejemplo el sistema experto PROSPECTOR [90] que usa el teorema de Bayes para la exploración de mineral [52].

Tratamientos de otras medidas de incertidumbre se pueden ver en Jackson [87].

En un sistema experto interactúan expertos humanos, base de conocimientos, base de hechos, motor de inferencia e interfaz de usuario y resumiendo existen dos tipos:

- Sistemas expertos basados en reglas.
- Sistemas expertos probabilísticos.

Para cada uno de ellos la solución a un determinado problema se obtiene:

- Aplicando reglas heurísticas pudiendo estar apoyadas en Lógica Difusa.
- Aplicando redes bayesianas, basadas en estadística y el teorema de Bayes.

2.4. SISTEMA EXPERTO BASADO EN REGLAS INCORPORANDO LÓGICA DIFUSA

Los sistemas expertos basados en reglas [53] abordan problemas del tipo determinista, es decir, siempre se produce idéntica salida si las condiciones de partida son las mismas.

Por otro lado, la Lógica Difusa [7] [8] [9] es una metodología de Inteligencia Artificial, eficaz cuando se trabaja con imprecisión o ambigüedad, datos erróneos o ausencia de estos y expresiones de personas lo que se da en el caso que nos ocupa.

Tal y como se comentó existen sistemas expertos basados en reglas que introducen una medida asociada a la incertidumbre de las reglas y a la de sus premisas. Un ejemplo son los sistemas expertos que incorporan la Lógica Difusa [46].

Por lo tanto, un sistema experto basado en reglas incorporando la Lógica Difusa, puede resolver problemas del tipo determinista con ambigüedad o imprecisión.

2.5. ESTRUCTURA BÁSICA DE UN SISTEMA EXPERTO BASADO EN REGLAS

Aunque no existe una estructura común de un sistema experto la mayoría de ellos constan de unos componentes básicos que se definen a continuación.

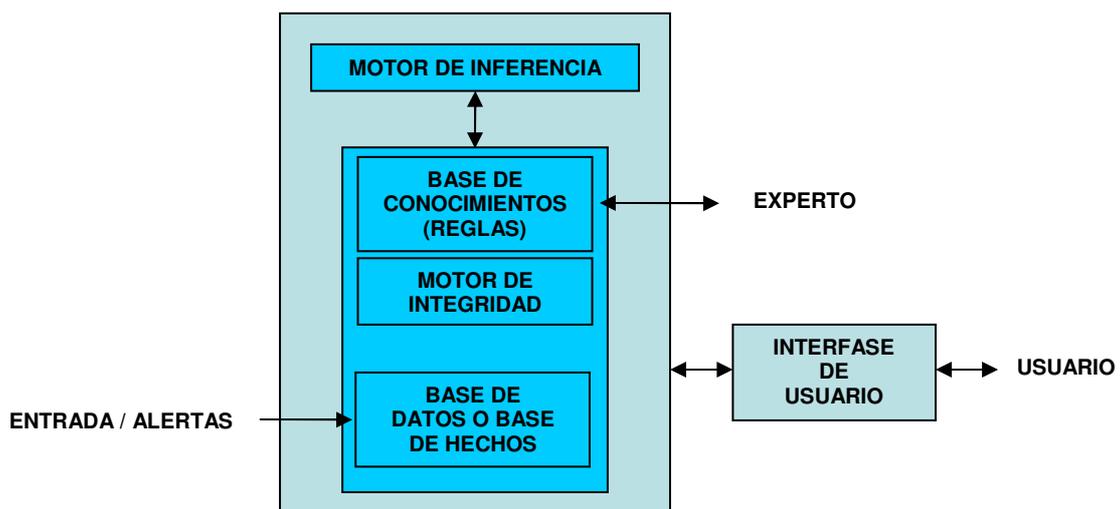


Figura 2: Sistema experto genérico basado en reglas (elaboración propia).

Las componentes de un sistema genérico basado en reglas son [52] [59]:

2.5.1. La base de conocimientos

Contiene el conocimiento especializado extraído del experto en el dominio, siendo el método utilizado para representar el conocimiento las reglas de producción.

El dominio de conocimiento representado se divide, por lo tanto, en pequeñas fracciones de conocimiento o reglas. Una característica a destacar es que la base de conocimientos es independiente del mecanismo de inferencia que se utiliza para resolver los problemas. De esta forma, cuando los conocimientos almacenados se han quedado obsoletos, o cuando se dispone de conocimientos nuevos, es relativamente fácil añadir reglas, eliminar las antiguas o corregir errores en las existentes. No es necesario reprogramar todo el sistema experto.

Las reglas se almacenan en una secuencia jerárquica lógica, pero no es rigurosamente necesario. Se pueden tener en cualquier secuencia y el motor de inferencia las usará en el orden adecuado que necesite para resolver un problema.

2.5.2. Base de datos o base de hechos

Parte de la memoria del ordenador que se utiliza para almacenar los datos recibidos para la resolución de un problema. Contiene conocimiento sobre el caso concreto en que se trabaja. También se registran las conclusiones intermedias y los datos generados en el proceso de inferencia.

Al memorizar todos los resultados intermedios, conserva la traza de los razonamientos efectuados y por lo tanto se puede utilizar para explicar las deducciones y el comportamiento del sistema.

2.5.3. El motor de inferencia

Programa que controla el proceso de razonamiento que seguirá el sistema experto.

Realiza tres operaciones: reconocer cuáles son las reglas aplicables, decidir cuál se va a aplicar y posteriormente aplicarla.

El motor de inferencia es el corazón del sistema experto y su principal cometido es sacar conclusiones aplicando el conocimiento a los datos. Utilizando los datos que se le suministran, recorre la base de conocimientos para alcanzar una solución.

La estrategia de control es de encadenamiento progresivo. Se comienza con los hechos disponibles en la base de datos y se buscan reglas que satisfagan esos datos, es decir, reglas que verifiquen la parte SI.

El sistema se comporta de la siguiente manera:

1. Evalúa las condiciones de todas las reglas respecto a la base de datos, identificando el conjunto de reglas que se pueden aplicar.
2. En el caso de no poder aplicar ninguna regla, se termina sin éxito. En caso contrario, se elige cualquiera de las reglas aplicables y se ejecuta, lo que genera nuevos hechos que se añaden a la base de datos.
3. Si se llega al objetivo, se ha resuelto el problema. En caso contrario, se vuelve al paso 1

A este enfoque se le llama también guiado por datos, ya que es el estado de la base de datos el que identifica las reglas que se pueden aplicar. El usuario comenzará introduciendo datos del problema en la base de datos del sistema.

2.5.4. El motor de integridad

Previene contradicciones y repeticiones en la base de conocimientos.

2.5.5. Interfaz de usuario

Permite la comunicación entre el usuario y el motor de inferencias, posibilitando introducir la información que necesita el sistema experto y comunicar al usuario las respuestas.

2.6. PROGRAMAS CONVECCIONALES VERSUS SISTEMAS EXPERTOS

Según Berzal [93], los programas convencionales se caracterizan por: un razonamiento algorítmico, control determinado por el programador, difíciles de modificar, con información precisa, que ofrecen una solución como resultado final y la solución es óptima.

Y los sistemas expertos por: un razonamiento heurístico, control determinado por el motor de inferencia, fáciles de modificar, con información no precisa, que ofrecen una recomendación razonada y una solución aceptable.

2.7. DESARROLLO DE UN SISTEMA EXPERTO

Weiss [91], que recoge también Castillo [52], propone como etapas para el diseño de un sistema experto:

1. Plantear y definir correctamente el problema.
2. Encontrar y seleccionar los expertos humanos capaces de resolver el problema [48] [49] [50] [51].
3. Diseñar el sistema experto, lo que incluye el diseño de las bases de conocimiento, motor de inferencia, interfaz de usuario, et.
4. Elegir la herramienta de desarrollo o lenguaje de programación.
5. Desarrollar y probar un prototipo.
6. Refinamiento y generalización, donde se corrigen los errores y se incorporan mejoras al diseño original.
7. Mantenimiento y puesta al día, donde el usuario evalúa, plantea problemas o defectos del prototipo, etc.

2.8. EJEMPLOS DE SISTEMAS EXPERTOS

Los sistemas expertos, en general, se han usado y se usan cada vez con mayor asiduidad en diferentes áreas de conocimiento:

ANDRITZ, proveedor a nivel mundial de las plantas, equipos y servicios para centrales hidroeléctricas dispone del sistema experto ACE. Un experto operador virtual que gestiona un área de proceso con que tiene por objetivo mantener los costes lo más bajos posible.

AT&T desarrolló en 1985 ACE (Automated Cable Expertise), un sistema experto basado en reglas destinado a asistir a técnicos de la compañía telefónica en el mantenimiento de los bucles de abonados y planta exterior. Hoy está disponible como producto comercial.

CATS, utilizado por GENERAL ELECTRIC, efectuaba tareas de mantenimiento en talleres de reparación de locomotoras. Sistema basado en reglas dedicado a diagnosticar averías y proponer soluciones.

DART, utilizado por IBM para diagnosticar errores en las unidades de control de disco de los sistemas informáticos.

En el sector de la Emergencias, algunos de los trabajos realizados en este campo son:

Roman [94] habla en su artículo de un sistema experto para el control de emergencia en grandes edificios vinculado con el plan de autoprotección.

Yanbing [45] [46] habla de cómo evaluar la mejor alternativa en emergencias y la capacidad de respuesta.

En este sector en general, y en España en particular, no se ha encontrado ningún sistema experto implantado y funcionando en Centros 1-1-2 para la ayuda a la toma de decisiones ante riegos por FMA que trabaje con las metodologías propuestas en esta tesis.

Según Berzal [93], algunos de los sistemas expertos según las áreas de conocimientos:

ÁREA DE CONOCIMIENTO	SISTEMA EXPERTO
Medicina	MYCIN [89], PUFF, ABEL, AI/COAG, AI/RHEUM, CADUCEUS, ANNA, BLUE BOX, ONCOCIN, VM, INTERNIST ANNA, BLUE BOX, ONCOCIN, VM, INTERNIST-I, CASNET I, CASNET
Química	CRYSALIS, DENDRAL [92], TQMSTUNE, CLONER, MOLGEN, SECS, SPEX
Matemáticas	AM (Automated Mathematician), EURISKO, SMP, MATHPERT, CCH MATHPERT, CCH-ES, ExperTAX ExperTAX
Informática	PTRANS, BDS, R1/XCON, XSEL, XSITE, DART, SNAP, YES/MVS, TIMM
Electrónica	ACE, IN ACE, IN-ATE, NDS, EURISKO, PALLADIO, IDEA, ATE, NDS, EURISKO, PALLADIO, IDEA, REDESIGN, CADHELP, SOPHIE
Ingeniería	REACTOR, DELTA (GE), JETA, STEAMER, SACON, CALLISTO, G2, SHARP, MARVEL, Pile CALLISTO, G2, SHARP, MARVEL.
Geología	DIPMETER, LITHO, MUD, PROSPECTOR [90]

Tabla 1: Sistemas expertos según diferentes áreas de conocimiento [93].

CAPÍTULO 3

LA TOMA DE DECISIONES

Y

SELECCIÓN DE EXPERTOS

3. LA TOMA DE DECISIONES Y SELECCIÓN DE EXPERTOS

3.1. INTRODUCCIÓN A LA TOMA DE DECISIONES

La toma de decisiones, una acción muy habitual en la vida cotidiana de las personas, se da por igual tanto en el ámbito personal como en el profesional. Diariamente responsables de empresas y organizaciones tienen que tomar decisiones, difíciles en la mayoría de los casos, durante el transcurso de su actividad profesional.

Se puede asegurar que una persona o conjunto de ellas se encuentran ante un problema de decisión cuando se plantea un conjunto bien determinado de alternativas (como mínimo dos) y un conflicto que obliga a elegir entre una de ellas, o bien establecer en ese conjunto unas prioridades y/o preferencias. También se puede entender que una buena decisión se da si pasado el tiempo las consecuencias se han manifestado como favorables. Sin embargo, existen ocasiones en las que no se pueden comparar las consecuencias de una decisión adoptada con las que se hubieran dado si se hubiera optado por otra solución. Teniendo en cuenta lo anterior, resulta también imprescindible valorar el proceso y/o método mediante el cual se adoptó la decisión final, con el objetivo de poder determinar si la solución fue la mejor posible, teniendo en cuenta la información disponible y características de entorno.

Según León [17] una buena decisión tiene las siguientes cualidades y/o características:

- Se ha trazado el objetivo que se quiere conseguir.
- Se ha recapitulado toda la información relevante.
- Se han tenido en cuenta las diferentes preferencias del decisor.

3.2. CONCEPTOS BÁSICOS

Algunos conceptos básicos del análisis de decisión son:

- Decisor o centro decisor: individuo o conjunto de individuos que tienen la responsabilidad de tomar la decisión. Decide o deciden sobre varias posibilidades o alternativas [18].
- Alternativa: opciones que tiene el decisor para la toma de decisión o conjunto de soluciones posibles a un problema.

Teniendo el conjunto de alternativas $A = \{A_1, A_2, A_3, A_4, \dots, A_m\}$, siendo m igual al número de alternativas, se supone que estas son diferentes (cada una es claramente diferenciable del resto), excluyentes (la elección de una impide la elección de otra) y exhaustivas (el conjunto forma el universo de decisión).

- **Analista:** individuo o conjunto de individuos que modela la situación concreta. El analista no expresa opiniones personales, se limita a reconocer las del decisor y a tratarlas de la forma más objetiva posible.
- **Ambiente o contexto de la situación de decisión:** el proceso de decisión transcurre en un entorno que se denomina ambiente o contexto. El conjunto de características que definen perfectamente la situación de decisión se denomina estado del ambiente o de la naturaleza [18].
- **Criterios:** los criterios de decisión constituyen los puntos de vista o parámetros que se utilizan para manifestar las preferencias del decisor. También puede decir que son las características que describen a las alternativas de dos formas posibles:
 1. Cuantitativa u objetiva.
 2. Cualitativa o subjetiva.

Para Romero [12] [13], el concepto de criterio engloba los conceptos de objetivo, atributo y meta, siendo los criterios los atributos, objetivos o metas que se consideran relevantes en un determinado problema de decisión:

1. **Atributos:** valores con los que el decisor se enfrenta a un determinado problema de decisión. Para la determinación de estos valores como atributos es fundamental que puedan medirse de forma independiente a los deseos del decisor.
2. **Objetivo:** el concepto atributo se enlaza con el concepto de objetivo, que representa las direcciones de mejora de los atributos que se estén considerando. La mejora puede ser maximizar o minimizar, es decir, corresponder a un proceso de maximización o minimización. Por ejemplo, maximizar las ganancias en un determinado proyecto, minimizar el riesgo de un determinado proceso, etc. En general, los objetivos toman la forma: $\text{Max } f(x)$ o $\text{Min } f(x)$.
3. **Meta:** el concepto objetivo se enlaza con el concepto meta, que representa el valor que cuantifica un nivel de logro aceptable que un atributo debe esforzarse por alcanzar. Por ejemplo, que los gastos de una empresa sean inferiores a

400.000 euros. También se puede decir que son las aspiraciones que expresan el nivel deseado de los atributos.

- Pesos: las ponderaciones o pesos reflejan el grado de importancia relativa que los criterios tienen para el decisor. A los diferentes criterios se asigna un vector de pesos $W = \{W_1, W_2, W_3, W_4, \dots, W_n\}$, siendo n igual al número de criterios.
- Normalización: para Romero [12] [13] la normalización de los criterios en métodos con soluciones finitas (multicriterio) no siempre es necesaria, aunque puede resultar esencial en determinados casos.
- Matriz de valoración o decisión: establecidos los criterios y pesos o ponderaciones asociados, el decisor debería ser capaz de para cada uno de los criterios y alternativas asignar un valor simbólico o numérico que exprese el juicio de valor de la alternativa con respecto al criterio.

Cada fila representa las valoraciones de la alternativa correspondiente con respecto al criterio considerado.

		CRITERIOS		
		C_1	C_j	C_n
ALTERNATIVAS	A_1	r_{11}	r_{1j}	r_{1n}
	⋮			
	A_i	r_{i1}	r_{ij}	r_{in}
	⋮			
	A_m	r_{m1}	r_{mj}	r_{mn}
		W_1	W_j	W_m
		PESOS		

Tabla 2: Matriz de decisión y/o valoración [20].

W_j : peso del criterio j , r_{ij} : puesto de la alternativa i con respecto al criterio j .

- Criterio de optimalidad paretiana [12] [13] o solución eficiente: en su formulación inicial el economista italiano Vilfredo Pareto consideraba que una colectividad se encuentra en estado óptimo si ninguna persona de esa colectividad puede mejorar su situación sin que empeore la situación de otra persona de la misma colectividad. Esta clase de optimalidad se denomina también eficiencia paretiana. Teniendo en cuenta lo anterior, un conjunto de soluciones se puede considerar como eficientes cuando son soluciones factibles o realizables, de tal forma que no existe otra solución también factible que proporcione una mejora en un atributo sin producir un empeoramiento en al menos otro de los atributos. A esta solución se le conoce como solución Pareto eficiente.

Dentro de los problemas de decisión se puede considerar que se dan:

1. Los que están bien definidos, son rutinarios, se dispone de la información adecuada y se pueden establecer muchas reglas para la elección de las alternativas.
2. Los que no están bien definidos, no son rutinarios, no se dispone de la información adecuada, no se pueden establecer muchas reglas para seleccionar las alternativas, impera el sentido común, etc.

Por otro lado, también se puede indicar que la toma de decisiones se puede dar bajo condiciones de:

1. Certeza (determinísticos): se conocen todos los datos. Son conocidos los estados de la naturaleza y como consecuencia los resultados establecidos para cada alternativa.
2. Incertidumbre: situaciones que no han ocurrido y quizás no vuelvan a ocurrir de la misma forma y con idénticas características. Las probabilidades de ocurrencia de los criterios son desconocidas. No hay información sobre los estados de la naturaleza.
3. Riesgo: existe un factor probabilístico de ocurrencia ligado a los criterios. Se conocen probabilidades objetivas o subjetivas de los estados de la naturaleza.

Por último, un problema de decisión tiene un conjunto de soluciones posibles, que son las alternativas, que hay que analizar en su resolución pudiendo ser:

1. Un número infinito, continuo o no numerable.
2. Un número finito o discreto

3.2.1. Asignación de pesos

A grandes rasgos, las formas y/o métodos más habituales usados para la asignación de ponderaciones o pesos son:

1. **Asignación directa:** se asignan directamente valores a los pesos usando tasación simple, ordenación simple o comparaciones sucesivas. En la tasación simple el decisor da una valoración de cada peso atendiendo a una escala determinada y una vez obtenidas las valoraciones se normalizan dividiendo cada valor por la suma de todos ellos. En definitiva, se establece una escala que determina el grado de importancia de los criterios, en la que cada experto asigna un peso a cada criterio según su experiencia y punto de vista.
2. **Autovector:** los pesos relacionados con cada criterio son los elementos del autovector asociado al autovalor dominante de una matriz de comparaciones por pares entre criterios.

3.2.2. Normalización de criterios

Tal y como se comentó anteriormente para Romero [12] [13] la normalización de los criterios en métodos con soluciones finitas (multicriterio) no siempre es necesaria, aunque puede resultar fundamental en determinados casos. Generalizando la normalización se hace necesaria por las siguientes razones:

1. En la mayor parte de los ambientes o contextos de decisión, las unidades utilizadas para medir los diferentes criterios suelen ser muy diferentes. Ante esto una comparación o agregación de los diferentes criterios carece de significado.
2. En gran cantidad de los problemas multicriterio los valores alcanzables por los diferentes criterios pueden ser tremendamente diferentes. Ante esto y sin una normalización previa los métodos con soluciones finitas (multicriterio) pueden llevar a soluciones incompletas o parciales hacia los criterios con valores alcanzables mayores.
3. En general la normalización previa de los criterios facilita el análisis de diferentes procedimientos para interaccionar con el decisor, con el propósito de obtener indicadores de sus preferencias. En bastantes casos los decisores realizan con mayor facilidad las tareas comparativas entre criterios cuando trabajan con valores

normalizados, que con sus correspondientes valores originales. Existen en la bibliografía variedad de procedimientos de normalización de criterios [60] [3].

Según Romero [12] [13] dentro de los procedimientos de normalización más usados se tienen los que se basan en:

- Dividir los valores que logra el criterio por su mejor valor, que corresponderá al máximo o mínimo dependiendo del caso. Para un problema en el que se valora el menor coste de un determinado producto será el mínimo y para un problema en el que se valora la mayor ganancia a obtener con la venta de un determinado producto será el máximo.
- Dividir los valores que logra el criterio por su recorrido, que será la diferencia entre el valor mejor y el peor.

Según Barba Romero [20] [27] [28] existen diferentes procedimientos que se basan en:

- Dividir por el máximo.
- Dividir por la suma de las evaluaciones de cada criterio u otros más elaborados [20] [27] [28].

Según el autor es importante tener en cuenta que la elección del procedimiento de normalización puede influir sobre el resultado final.

3.3. LA TOMA DE DECISIONES MULTICRITERIO

Un problema de decisión tiene un conjunto de soluciones posibles, que son las alternativas, que hay que analizar en su resolución pudiendo ser:

- Un número infinito, continuo o no numerable.
- Un número finito o discreto

Los problemas de decisión del primer caso son estudiados por la Optimización Multiobjetivo.

Los problemas de decisión del segundo caso, en los que las alternativas de decisión son un número finito de valores, son estudiados por los Métodos de Análisis de Decisión Multicriterio, también se les llama Decisión Multiatributo.

El término estándar anglosajón es MultiAttribute Decision Making (MADM).

En este caso, la decisión se apoyará en las diversas características o atributos de las alternativas respecto a los criterios de decisión.

Generalizando, para tomar decisiones eficientes, y tal y como se comentaba anteriormente, se necesita:

- Haber trazado el objetivo que se quiere conseguir.
- Haber recapitulado toda la información relevante y contrastada que refleje lo mejor posible la realidad.
- Haber tenido en cuenta las diferentes preferencias del decisor.
- La experiencia de los expertos.
- Sentido común.

En líneas generales, el proceso de toma de decisiones multicriterio se estructura en las siguientes fases:

1. Estructuración del problema:

- Definir el problema: todo parte de una correcta definición del problema, lo que influirá sobre el desarrollo de las demás fases, siendo una de las partes más importantes de todo el proceso. Sin un problema bien definido y planteado no se puede llegar a una solución efectiva.
- Identificar las alternativas: identificar las posibles soluciones al problema planteado. Entre ellas el decisor deberá tomar la decisión.
- Determinar los criterios: características más relevantes consideradas por los decisores. Manifiestan sus preferencias y puntos de vista. Pueden ser cualitativos y cuantitativos. Para Romero [12] [13], el concepto de criterio engloba los conceptos de objetivo, atributo y meta, ya vistos con anterioridad. Posteriormente y en función de ellos se evaluará que alternativa es la idónea.

2. Análisis:

- Evaluar las alternativas: va a depender del método de evaluación utilizado. TOPSIS, Proceso Analítico Jerárquico (AHP), Ponderación Lineal (Scoring),

etc. Se pueden utilizar métodos híbridos como por ejemplo AHP para la obtención del peso de los criterios y TOPSIS para evaluar las alternativas.

- Elegir una opción: en base al paso anterior en el que se evaluaron las alternativas se obtendrá una solución con mejores perspectivas que el resto.
3. Implementar la decisión: una vez obtenida la alternativa o solución más favorable se procede a su implementación.
 4. Evaluar resultados: los resultados generados habrán de ser evaluados.

FASES DE UN PROCESO DE TOMA DE DECISIONES MULTICRITERIO

(Los puntos 1, 2 y 3 corresponden a la estructuración del problema y 4 y 5 al análisis)

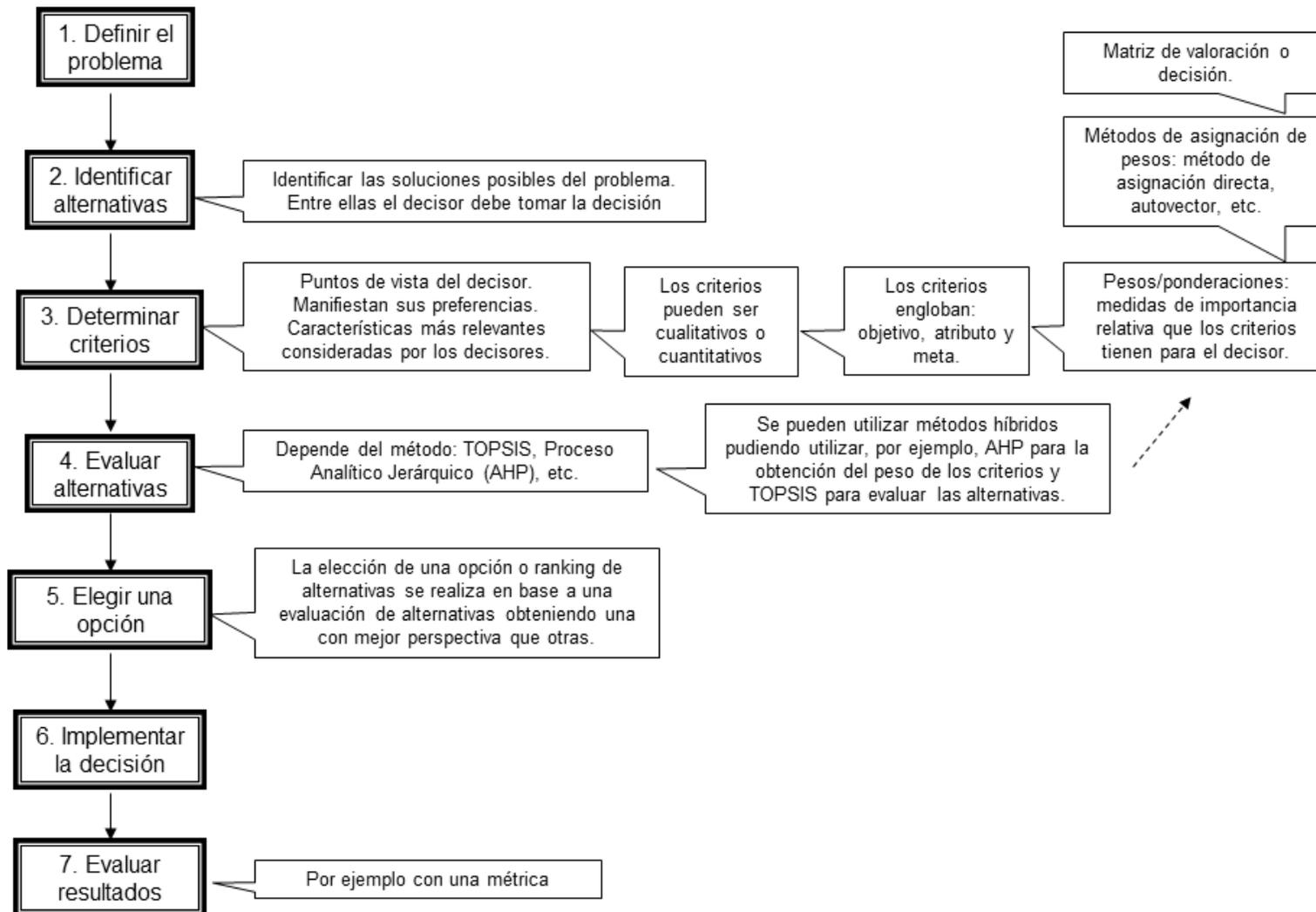


Figura 3: Fases de un proceso de toma de decisiones muticriterio (elaboración propia en base a [14] [15] [16])

3.4. LA SELECCIÓN DE EXPERTOS

Antes de proseguir y realizar un recorrido por los principales métodos de decisión multicriterio se hace necesario abordar el tema de la selección de expertos para crear la base de datos.

Cuando se intenta resolver problemas como el planteado, la elección de expertos es una de las fases que en muchas ocasiones no se le presta la suficiente consideración. En líneas generales la elección se realiza por intuición o referencias pero:

¿Quién asegura que el experto es el idóneo o reúne las condiciones suficientes para el problema que se intenta resolver? ¿Cuántos expertos son suficientes? ¿En qué criterios se debería basar la elección de los expertos?

El experto o grupo de expertos deberían ser capaces de proporcionar juicios, valoraciones y recomendaciones del problema que se está tratando, de una forma eficaz y eficiente.

Según Cabero [50] en los últimos años han aparecido diferentes técnicas cuya base es la autoevaluación de la persona, con el fin de determinar su competencia experta, lo que puede permitir obtener mejores expertos.

Para confeccionar la lista de posibles participantes a formar el grupo de expertos, entre los cuales se realizará la selección de los que formaran el grupo final, se tendrá en cuenta el método descrito por García y Fernández [51], Villalobos [48], Cabero [50] y Sánchez [49], entre otros, denominado “Coeficiente de competencia experta”.

El “Coeficiente de competencia experta” o “Coeficiente K” se utilizará para la selección de expertos, el cual se basa en la autoevaluación de cada experto en relación a su nivel de conocimiento sobre el problema que se está resolviendo.

Por otro lado, y en relación a la cantidad de expertos a utilizar, la bibliografía especializada no aporta conclusiones del todo exactas.

Mientras algunos autores recomiendan utilizar el modelo binomial para la selección de la cantidad de expertos [48], otros consideran que cifras iguales o mayores de 7 sería lo ideal, preferiblemente seleccionados en cantidades impares (7, 9, 11...), con el fin de

evitar votos divididos en cantidades iguales y poder adoptar decisiones a partir de la consideración de la mitad más uno.

Sin embargo, también están los autores que recomiendan que el equipo de expertos no hubiera de estar compuesto por más de 7 personas y los que recomiendan revisar la relación entre la cantidad de expertos y el error obtenido a partir del procesamiento de los criterios aportados por éstos.

Según Villalobos [48] en líneas generales y para la selección de los expertos debería tenerse en cuenta:

- Su nivel de competencia.
- Su creatividad.
- Disposición a participar en la encuesta.
- Capacidad de análisis, de trabajo en equipo y carácter autocrítico.

Y para el caso que se plantea además debería tenerse en cuenta:

- El conocimiento demostrado del problema que se intenta resolver.
- Poseer años de experiencia en la actividad relacionada.
- El conocimiento desde el punto de vista teórico y práctico de las características del sistema.

Y se debería evitar:

- La consideración de un experto por el grado científico, el título académico o el cargo que ocupa.

Para determinar el nivel de competencia se les solicita a los diferentes expertos, que se han seleccionado, que se autoevalúen sobre los conocimientos que tienen del tema tratado. Para ello se utiliza una escala del 1 al 10, teniendo en cuenta que el valor 0 se asocia a la ausencia de conocimiento y 10 al máximo conocimiento e información.

Valoración del experto sobre su nivel de competencia o conocimiento del problema que se está analizando.									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Tabla 3: Valoración del experto sobre su nivel de conocimiento.

Además, se le pide que valoren el grado de influencia que han tenido cada una de las fuentes de conocimiento que se le plantean y/o el papel que han desempeñado en la adquisición de los conocimientos, es decir, de donde proceden sus conocimientos.

Pueden ser incluidas las fuentes que se consideren necesarias.

Fuentes de conocimiento	Grado de influencia de las diferentes fuentes de conocimiento		
	Alto	Medio	Bajo
Análisis teóricos realizados por el experto.	0.3	0.2	0.1
Experiencia profesional (según García y Fernández [51] ≥ 5 años).	0.5	0.4	0.2
Conocimiento propio acerca del estado del problema en el extranjero.	0.05	0.05	0.05
Publicaciones de autores nacionales.	0.05	0.05	0.05
Publicaciones de autores extranjeros.	0.05	0.05	0.05
Intuición del experto.	0.05	0.05	0.05
SUMA	1	0.8	0.5

Tabla 4: Puntuaciones usualmente utilizadas para la valoración de las fuentes de conocimiento de acuerdo con los diferentes autores que han desarrollado el procedimiento y/o método.

En cada uno de los niveles (alto, medio, bajo) y para cada una de las fuentes de conocimiento se asigna un valor de tal manera que:

- Para el nivel alto se reparte 1 punto entre las diferentes fuentes de conocimiento.

- Para el nivel medio se reparte 0.8 puntos entre las diferentes fuentes de conocimiento.
- Para el nivel bajo se reparte 0.5 puntos entre las diferentes fuentes de conocimiento.

También la valoración puede ser realizada en porcentajes.

Tal y como comentó anteriormente para la selección de expertos se utilizará el denominado coeficiente de competencia K, el cual se obtiene a través de la autoevaluación de cada experto sobre su nivel de conocimiento en relación al problema que se está resolviendo. Sin embargo, cabe la posibilidad de hacerse a través de un grupo de potenciales expertos, superiores jerárquicos, etc., es decir, que no sean los propios expertos los que se autoevalúen.

El coeficiente de competencia K se obtiene a través de la siguiente fórmula:

$$K = \frac{(K_c + K_a)}{2}$$

Siendo:

- K_c el coeficiente de conocimiento o información que tiene el experto acerca del problema.

$$K_c = \frac{A_c}{10}$$

Siendo A_c el valor numérico correspondiente a la autoevaluación del conocimiento del propio experto. Recordar que para determinar el nivel de competencia cada experto se autoevalúa sobre los conocimientos que tienen del tema tratado. Para ello se utiliza una escala del 1 al 10.

- K_a el coeficiente de argumentación o fundamentación de los criterios para cada experto.

$$K_a = \sum_{i=1}^i C_i$$

C_i es el valor que corresponde al nivel (alto, medio y bajo) aportado por cada experto para cada fuente de conocimiento (en este caso 6).

Según García y Fernández [51] el coeficiente de competencia se evalúa a partir de:

- Si $0.8 \leq K \leq 1.0$ entonces el coeficiente de competencia es alto.
- Si $0.5 \leq K \leq 0.8$ entonces el coeficiente de competencia es medio.
- Si $K \leq 0.5$ entonces el coeficiente de competencia es bajo.

A través de las diferentes encuestas se rellenan los datos personales y si se estima necesario se pueden agregar opiniones y recomendaciones.

Se recomienda utilizar expertos con autoevaluaciones en niveles alto y en todo caso medio, desechando los coeficientes de competencia bajo.

Tras la aplicación del procedimiento se obtiene el coeficiente de competencia de los expertos, lo que garantiza una selección racional.

3.5. RECORRIDO POR LOS PRINCIPALES MÉTODOS DE DECISIÓN MULTICRITERIO

3.5.1. Introducción

Con anterioridad se comentó que los problemas de decisión que tienen un número finito de soluciones son estudiados por los Métodos de Análisis de Decisión Multicriterio.

Según Berumen [19] los principales métodos de decisión multicriterio discreto son:

- Ponderación Lineal (SCORING).
- Utilidad Multiatributo (MAUT).
- Proceso Analítico Jerárquico (AHP).
- Relaciones de o Superación / Superioridad /Sobrecalificación (Outranking).

Sin embargo, existe una extensa bibliografía sobre estos y otros métodos empleados en el análisis multicriterio discreto que, generalizando y agrupando, se pueden clasificar en:

- **MÉTODOS COMPENSATORIOS:**

Se basan en si las ventajas de un determinado atributo o criterio pueden ser intercambiadas por las desventajas de otro, o si por el contrario este intercambio no es posible. Una estrategia de elección es compensatoria si los intercambios de logros entre atributos (trade-offs) están permitidos. La estrategia será por el contrario no compensatoria si no están permitidas dichas compensaciones.

Ponderación Lineal (SCORING), Utilidad Multiatributo (MAUT) y el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) son típicos métodos compensatorios.

- **MÉTODOS DE RELACIONES DE SUPERACIÓN [13] /SOBRECALIFICACIÓN (OUTRANKING) [20]:**

Son métodos no compensatorios, no están permitidos los intercambios de logros entre atributos o criterios. Están basados en comparaciones binarias de alternativas (concordancia), es decir, comparaciones de las alternativas dos a dos, criterio por criterio.

ELECTRE (ELimination Et Choix Traduisant la REalité) y PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation) son típicos métodos basados en relaciones de superación / sobrecalificación.

Por otro lado y según Barba Romero [20] en cuanto a los métodos de agregación (procedimientos matemáticos y estadísticos que posibilitan sintetizar los valores obtenidos por cada alternativa respecto a todos los criterios considerados), como factores relevantes a la hora de clasificarlos se podrían considerar las dimensiones de la matriz de decisión, la forma de medirse las evaluaciones y los pesos, las exigencias de información, el carácter compensatorio o no, el tipo de resultados que ofrecen, etc. Las características enumeradas son importantes pero por si solas incompletas como factores que puedan determinar una clasificación, por eso opta por una clasificación basada en la similitud de estructura y operativa de los diversos métodos:

- Método Lexicográfico.
- Método de Ponderación Lineal.
- Utilidad Multiatributo.
- Métodos basados en relaciones superación.

En el presente documento se profundizará sobre los que se han considerado más relevantes para la investigación realizada.

Además de los métodos empleados para el análisis multicriterio, algunos de los cuales se verán a continuación, existen también un conjunto de métodos para la ponderación y/o asignación de pesos. Normalmente se emplean en determinadas etapas de los métodos del análisis multicriterio discreto y a grandes rasgos se pueden clasificar en métodos de asignación directa y autovector, vistos anteriormente.

Sin embargo Golany [24] habla de dos métodos para determinar las prioridades y/o preferencias, los basados en el vector propio, como AHP, y los métodos extremos como mínimos cuadrados ponderados, mínimos cuadrados directos, mínimos cuadrados logarítmicos y valores absolutos mínimos.

Finalmente, y en cuanto a la asignación de pesos, existe variedad de métodos entre los cuales se encuentra el AHP, que además de asignar pesos se puede considerar como una metodología de toma de decisión. En AHP no es necesaria una asignación de pesos al principio, sino que esta es una consecuencia. El establecimiento de prioridades se hace a través de una evaluación por pares.

3.5.2. Las evaluaciones, la normalización y los pesos

Antes de empezar el recorrido por los principales métodos de decisión multicriterio, se abordará algunos problemas que de no ser tenidos en cuenta pueden llegar a crear distorsiones en los resultados.

Según Barba Romero [20] los r_{ij} , valor de la alternativa i con respecto al criterio j , pueden venir en cualquiera de las escalas conocidas, unas más precisas y otras menos. Con la normalización se busca, si el método lo exige, que las evaluaciones r_{ij} , de una alternativa concreta i , correspondientes a un criterio j sean comparables con las correspondientes a los otros criterios.

Además, existe una comprensible tendencia a utilizar procedimientos que exijan lo mínimo posible del decisor. Aquí se engloban los procedimientos cualitativos ya que estos suelen plantear cuestiones como: ¿Este criterio es más importante que este otro? y

no cuestiones quizás más incómodas de contestar como: ¿Cuántas veces es más importante?

Según Romero C [13] es importante aclarar que si la normalización de criterios requiere exclusivamente una información de tipo técnico, la estimación de los pesos conlleva una importante carga subjetiva, lo que hace necesario realizar interacción con el centro decisor.

3.5.3. El Método Lexicográfico

El método se denomina lexicográfico ya que de idéntica manera se ordenan las palabras del diccionario.

Se suele utilizar para resolver problemas en los que se conocen las preferencias ordinales de los criterios [13] [25]. Se recomienda su utilización siempre que se disponga de información relativa a la importancia de cada uno de los criterios. No es necesaria la utilización de una ponderación o peso, sino ser capaz de realizar un ordenamiento de los criterios de acuerdo a la importancia de cada uno de ellos.

A grandes rasgos los pasos serían:

1. En primer lugar el decisor ordena los criterios, del más importante al menos.
2. Las alternativas son comparadas una a una, primero con el criterio más importante, siendo eliminadas las de menor valor obtenido en la comparación
3. Se repite la comparación de las alternativas con el segundo criterio, tercero, etc.
4. Se obtiene o establece un orden de los criterios y un pre orden o semi-orden de las evaluaciones.

Según Barba Romero [20] y con mayor grado de detalle el procedimiento consiste en tomar el criterio con mayor peso y atendiendo a su vector de evaluaciones, se elige la mejor alternativa. En caso de empate este se soluciona con el segundo criterio en importancia y así sucesivamente.

Del mismo modo en el que se ordenan las palabras del diccionario, el criterio más importante es la primera letra, los casos de igualdad son resueltos con la segunda letra y así sucesivamente.

Entre sus variantes destaca el llamado semiorden lexicográfico [26] en el que el segundo de los criterios es considerado no sólo en el caso de empate en el anterior sino cuando las diferencias entre las mejores evaluaciones de éste son menores que una cierta tolerancia prefijada.

Posibles ventajas:

- Método sencillo de aplicar.
- Método sencillo por la información que demanda al decisor.
- No requiere comparabilidad entre criterios, dado que es no compensatorio.

Posibles inconvenientes:

- No utiliza toda la información disponible por lo que en ocasiones se desaprovecha parte de ella.

Ejemplos:

- Ordenación alfabética de un diccionario.

3.5.4. Métodos de relaciones de superación / sobrecalificación

En los métodos basados en relaciones de superación, sobrecalificación, graduación (“outranking”), el que toma las decisiones puede expresar sus preferencias, indiferencias o ausencia de cualquier opinión en el momento que realiza la comparación de una alternativa con otra para cada uno de los criterios.

Están basados en comparaciones binarias de alternativas (concordancia), es decir, comparaciones de las alternativas dos a dos, criterio por criterio.

En este grupo destacan, entre otros, el método ELECTRE (ELimination Et Choix Traduisant la REalité), el método PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation) y TOPSIS (Flament, 1999) que se verán a continuación.

Los métodos de sobrecalificación suelen tener un número reducido de alternativas o soluciones posibles a evaluar.

3.5.4.1. Relación de sobreclasificación (concordancia y discordancia)

Antes de seguir avanzando con los diferentes métodos que componen este grupo, se hace necesario introducir los conceptos de relación de sobreclasificación (outranking relationship) y concordancia y discordancia.

La alternativa A_i sobreclasifica a la A_k (o la alternativa A_i es preferible a la A_k), si A_i es igual o superior a A_k en la mayoría de los criterios. La sobreclasificación se establece en base a:

- **CONCORDANCIA:** mide hasta qué punto para un alto número de atributos la alternativa A_i es más preferida que la alternativa A_k .
- **DISCORDANCIA:** mide hasta qué punto no existe ningún atributo para el que A_k sea mucho mejor que la alternativa A_i .

3.5.4.2. El método ELECTRE

ELECTRE [13] [20], perteneciente al grupo de métodos basados en relaciones de superación, consiste en llegar a una solución, que sin ser óptima puede considerarse satisfactoria o bien se determina una jerarquización de las diferentes alternativas bajo análisis.

Este método fue desarrollado por la escuela francófona formada por Francia, Bélgica y Suiza.

En la actualidad han sido desarrollados los métodos ELECTRE I, II, III IV, IS y ELECTRE TRI.

En líneas generales, se basa en reducir la dimensión del conjunto de soluciones eficientes, que se realiza mediante una división del citado conjunto en:

1. Un subconjunto de alternativas más favorables (núcleo).
2. Un subconjunto de alternativas menos favorables.

El concepto visto anteriormente, relación de sobreclasificación, forma parte del ELECTRE y todas sus variantes.

Según Romero [13], la principal ventaja de la relación de sobreclasificación es que en ella no se tiene que cumplir obligatoriamente ni la transitividad ni la comparabilidad de preferencias, es decir:

- Si $A_1 S A_2$ y $A_2 S A_3$, siendo S la relación de sobreclasificación, esto no implica obligatoriamente que $A_1 S A_3$. ELECTRE, entiende que las razones que llevan al decisor/es a preferir A_1 frente a A_2 y A_2 frente a A_3 pueden ser muy diferentes y por lo tanto no conducir a que A_1 sea preferida frente a A_3 .
- En bastantes ocasiones sucede que el decisor/es no puede o no estima necesario comparar alternativas, por falta de información, imprecisión en las mediciones, o por la gran magnitud de los criterios que impiden o dificultan su medición, etc.

La relación de sobreclasificación se utiliza para constituir un grafo en el que cada vértice representa una alternativa. Partiendo del grafo construido se crea un subgrafo, que forma el kernel o núcleo del conjunto de alternativas favorables.

Los vértices del Kernel representan las alternativas preferidas según la relación de sobreclasificación, constituida en base a la concordancia y discordancia. Los vértices que no constituyen parte del núcleo se eliminan.

Los pasos o fases el método son:

1. Se empieza con una matriz de decisiones y un vector de pesos W , obtenido tras aplicar alguno de los procedimientos existentes.
2. Con la matriz de decisiones y el vector de pesos W se calcula la matriz de índices de concordancia. El índice de concordancia $c(i,k)$ entre las alternativas A_i y A_k se obtiene por medio de la suma de los pesos asociados a los criterios en los que A_i es mejor que la A_k . Si existe empate se establece la mitad del peso a cada una de las alternativas.
3. Se normaliza la matriz de decisiones inicial con alguno de los procedimientos existentes.
4. Se multiplica cada columna de la matriz normalizada por el peso correspondiente, obteniendo así la matriz de decisiones normalizada y ponderada.
5. De la matriz del paso anterior se extraen los índices de discordancia. La discordancia $d(i,k)$, entre A_i y A_k , es calculada utilizando la mayor diferencia entre

los criterios para los que A_i está dominada por A_k y dividiendo posteriormente dicha cantidad por la mayor diferencia (en valor absoluto) entre los resultados alcanzados por la alternativa i y la k . Finalmente con los índices de discordancia se construye la matriz de índices de discordancia.

6. Se fijan los umbrales:

- Mínimo, c_{\min} , para el índice de concordancia.
- Máximo, d_{\max} , para el índice de discordancia.

7. Se obtiene la matriz de dominancia concordante aplicando el siguiente procedimiento: si un elemento de la matriz de índices de concordancia, calculada en el paso 2, es mayor que el valor umbral c_{\min} , en la matriz de dominancia concordante se escribe un uno, sino un cero.

8. Se obtiene la matriz de dominancia discordante aplicando el siguiente procedimiento: si un elemento de la matriz de índices de discordancia, calculada en el paso 5, es menor que el valor umbral d_{\max} , en la matriz de dominancia discordante se escribe un uno, sino un cero.

9. Se obtiene la matriz de dominancia agregada multiplicando los términos homólogos de las matrices de dominancia concordante y discordante. La interpretación se le supone muy intuitiva ya que:

- Si el elemento ik toma el valor uno muestra que la A_i es mejor que la A_k en una cantidad significativa de criterios (concordancia) y no es peor para ningún criterio (discordancia). Que es lo mismo que A_i sobrecalifica a A_k .
- Si el elemento ik toma el valor cero, esto significa que A_i no es mejor que A_k en una cantidad significativa de criterios y/o es claramente peor para algún criterio. Que es lo mismo que A_i no sobrecalifica a A_k .

10. Finalmente se obtiene el grafo ELECTRE.

Cada alternativa representa un vértice del citado grafo. Del vértice i al vértice k se traza un arco, si y sólo si el correspondiente elemento de la matriz de dominancia agregada es uno. El grafo representa una ordenación parcial de preferencias de las alternativas.

El kernel del grafo está constituido por las alternativas que no se dominan/sobreclasifican entre sí, o sea, no hay arcos de entrada en los correspondientes vértices, quedando las restantes alternativas dominadas/sobreclasificadas por alguna alternativa del kernel. Es decir, existe al menos algún vértice del kernel del que sale un arco a los vértices que no forman parte del kernel. Las alternativas que no forman parte del kernel se eliminan del proceso de elección.

Tal y como se comentó anteriormente, en la actualidad han sido desarrollados los métodos ELECTRE I, II, III, IV, IS y ELECTRE TRI.

En esta tesis solo se analiza el ELECTRE I, la base del resto de métodos ELECTRE. Sin embargo, resulta interesante reseñar algunas características de los cuatro primeros métodos con el objetivo de conocer su evolución.

Anotar que conforme al nivel de incertidumbre, existen relaciones de superación determinísticas y borrosas o difusas (fuzzy).

No cabe duda que el ELECTRE I, método que se ha estado analizando, constituye el primer método de sobreclasificación publicado. Para Romero [13] este método ha sido ampliamente utilizado con buenos resultados, aunque existen otros desarrollos y extensiones de esta tipología de métodos con mayor elaboración teórica. Entre ellos se pueden encontrar:

- ELECTRE II: admite obtener una ordenación completa de las alternativas no dominadas.
- ELECTRE III: la relación de sobreclasificación se basa en conjuntos borrosos.
- ELECTRE IV: para los casos en los que el decisor/es no desean especificar los pesos preferenciales

Una revisión de la metodología ELECTRE puede verse en [30].

Por último, y formando parte de la familia de métodos de sobreclasificación, debe nombrarse PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations), el cual permite obtener una ordenación total o parcial de las alternativas no dominadas [32].

En el anexo I se añade un ejemplo resuelto con el método ELECTRE I referente a la utilización de Vehículos Aéreos No Tripulados (RPAS), aplicados a la gestión de seguridad y emergencias, donde se priorizan diferentes alternativas.

3.5.4.3. El método PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations)

Este método de sobreclasificación permite la ordenación total o parcial de las alternativas no dominadas.

Desarrollado por Brans y Vincke [32] se basa en la construcción de relaciones de superación valorizadas.

PROMETHEE hace bastante uso del pseudo-criterio (un criterio con dos funciones umbrales), de igual manera que el ELECTRE III, IV y IS. Construye el grado de superación entre cada par ordenado de acciones teniendo en cuenta la diferencia de puntuación que las citadas acciones tienen con respecto a cada atributo. La valuación de esas diferencias puede realizarse mediante funciones de valor que son utilizadas de acuerdo a las preferencias del decisor.

Se han desarrollado las versiones PROMETHEE II, PROMETHEE III, PROMETHEE IV y PROMETHEE V.

3.5.5. El método TOPSIS (Technique for Order of Preference by similarity to Ideal Solution)

El método de programación por compromiso, TOPSIS, es una técnica utilizada inicialmente en entornos continuos, en los que el conjunto de soluciones posibles es infinito y que ha sido modificada para el análisis de problemas multicriterio de tipo discretos, en el que el conjunto de soluciones posibles es finito.

Fue desarrollado por Hwang y Yon [33].

Destaca por su sencillez y se basa en la premisa de que es razonable elegir un resultado que esté lo más cerca posible de una situación ideal y lo más lejos posible de la no ideal o ideal negativa [34].

Las soluciones así identificadas se denominan soluciones compromiso y constituyen el conjunto de compromiso. Esta técnica está basada en el concepto de que una alternativa seleccionada debe tener la distancia más corta posible hacia la solución ideal positiva y lo más lejos posible respecto de la solución ideal negativa.

El método suele ser idóneo para el tratamiento multicriterio de problemas que aparecen en los Sistemas de Información Geográfica. También existen muchas aplicaciones en relación con la Lógica Difusa.

El método se desarrolla en una serie de etapas:

1. Se construye la matriz de decisión y se normaliza.
2. Se construye el vector de pesos con el fin de obtener la matriz de decisión normalizada y ponderada.
3. Se identifican y/o definen las soluciones ideal positiva e ideal negativa del problema y se calculan.
4. Se calculan las distancias relativas de cada alternativa a la solución ideal positiva y negativa.
5. Se ordenan las alternativas de acuerdo a su distancia relativa.

3.5.6. Ponderación Lineal (SCORING)

Método sencillo e intuitivo de aplicar que permite de forma rápida y fácil localizar la alternativa preferida en un problema de decisión multicriterio discreto. *Se suele usar cuando se dispone de poca información, en situaciones de incertidumbre.*

Con este método se obtiene una puntuación global a través de la suma de las contribuciones de cada atributo. Si existen criterios con diferentes escalas no se pueden sumar directamente, se requiere de un proceso de normalización antes de sumar las contribuciones de cada uno de los atributos.

Según Berumen [19] debe tenerse en cuenta que *el orden obtenido con este método no es independiente del procedimiento de normalización aplicado, es decir, el orden va a depender del procedimiento de normalización.*

Según Barba Romero [20] es un método compensatorio que necesita una normalización previa de las evaluaciones. El problema del método se centra sobre una adecuada estimación de los pesos W_i y aunque es un método muy sencillo e intuitivo de aplicar puede dar problemas si no se tiene en cuenta lo anterior.

Las diferentes fases del método SCORING son:

1. Identificar y definir la meta del problema de decisión.
2. Identificar y definir las alternativas.
3. Identificar y definir los criterios.
4. Realizar la ponderación de los criterios.
5. Establecer en cuanto satisface cada alternativa a nivel de cada uno de los criterios.
6. Calcular el score para cada alternativa. El score más alto representa a la mejor de las alternativas.

El cálculo del score se realiza atendiendo a:

El conjunto de alternativas se puede definir como $A = \{A_1, A_2, A_3, A_4, \dots, A_m\}$, donde A_i ($i = 1, 2, \dots, m$) son cada una de las alternativas posibles.

El conjunto de criterios se puede definir como $C = \{C_1, C_2, C_3, C_4, \dots, C_n\}$, donde C_j ($j = 1, 2, \dots, n$) son cada una de los criterios posibles.

El conjunto de pesos o ponderación para cada uno de los criterios se puede definir como $W = \{W_1, W_2, W_3, W_4, \dots, W_n\}$, donde W_j ($j = 1, 2, \dots, n$) son cada una de los pesos o ponderaciones posibles para cada criterio C_i .

Por lo tanto, el score para cada alternativa A_i ($i = 1, 2, \dots, m$) vendrá dado por la función de valor para cada una de las alternativas:

$U(A_i) = \sum_j w_j r_{ij}$, siendo r_{ij} el rating de la alternativa i con respecto al criterio j y W_j el peso del criterio j .

En resumen, el esquema básico de este método según Barba Romero [20] consiste en construir una función de valor $U(A_i)$ para cada alternativa.

Se añade un ejemplo resuelto de toma de decisiones con SCORING en el anexo I.

3.5.7. Utilidad Multiatributo (MAUT–Multi Attribute Utility Theory)

Método que suele requerir gran cantidad de información del decisor para construir la función de utilidad multiatributo. Se representa una función parcial de utilidad para cada atributo, de acuerdo con las preferencias de los decisores, que posteriormente se agregan a una función multiatributo (MAUT) de forma multiplicativa o aditiva. Por último y tras determinarse la función de utilidad para cada una de las alternativas se consigue una ordenación del conjunto y por tanto las preferencias.

Según Romero [20] este método generaliza al de Ponderación Lineal, permitiendo funciones de valor más sofisticadas e incorporando la posibilidad de valorar el riesgo y la incertidumbre.

Se basa en construir una función de utilidad $U(A_i) = U(r_{i1} \dots r_{ij} \dots r_{in})$.

Que los criterios sean más o menos independientes permitirá reducir el problema a otros más sencillos a la hora de construir funciones univariantes $U_j(r_{ij})$ que se agregarán posteriormente.

El caso más sencillo es el aditivo, similar al método de Ponderación Lineal.

3.5.8. Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

El Método Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Process, AHP), propuesto por Saaty en 1980 [3] [4] [5] [6], se basa en que la resolución de un problema de toma de decisión con múltiples criterios se puede solucionar mediante la estructuración jerárquica de dicho problema.

El método está basado en la obtención de preferencias o pesos de importancia para criterios y alternativas. En el proceso, el decisor constituye los que se puede denominar “juicios de valores”, basándose en la escala numérica de Saaty (del 1 al 9) y comparando por parejas criterios y alternativas.

Los fundamentos en los que se basa el método son:

- Psicológicos.
- Matemáticos.
- Contrastes empíricos.

Los *fundamentos psicológicos* se basan en observaciones de psicólogos de finales del siglo XIX y principios del XX, mediante las que se determina que la mente humana está bien diseñada para la comparación por pares, es decir, comparar elementos de dos en dos. Sin embargo, se comporta de peor manera con las comparaciones globales.

En base a lo expuesto, el profesor Saaty [3] desarrolla una escala de comparación que va a permitir realizar las comparaciones por pares entre elementos y que va a formar parte importante de la base del método.

Escala	Definición	Explicación
1	Igualmente preferida y/o igual importancia	Dos actividades contribuyen de igual manera al objetivo
3	Moderadamente preferida y/o mediana importancia	La experiencia y el juicio favorecen un poco una actividad sobre la otra.
5	Fuertemente preferida y/o mucha importancia	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente una actividad sobre la otra.
7	Muy fuertemente preferida y/o gran importancia o importancia demostrada	Se favorece mucho una actividad sobre otra; su dominancia está demostrada en la práctica.
9	Extremadamente preferida y/o extrema importancia	La evidencia que favorece una actividad sobre otra es el grado más alto de afirmación.

Tabla 5: Escala de Saaty [3].

Los *fundamentos matemáticos* se basan en el álgebra matricial, dado que los elementos con los que trabaja el método son fundamentalmente matrices que deben cumplir una serie de características, entre las que se encuentran:

- Reciprocidad:

Si $a_{ij} = x \Rightarrow a_{ji} = \frac{1}{x} \forall x / \frac{1}{9} \leq x \leq 9$, lo que gráficamente para una matriz A se representa:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix} \text{ si se cumple que } 1 \leq a_{ij} \leq 9$$

- Homogeneidad:

Si los elementos i y j son considerados igualmente importantes entonces $a_{ij} = a_{ji} = 1$ además $a_{ii} = 1 \forall i$

- Consistencia:

Se satisface que $a_{ik} * a_{kj} = a_{ij} \forall i, j, k / 1 \leq i, j, k \leq q$.

La inconsistencia de una matriz implica la necesidad de replantear y ajustar los valores.

Por último, el método está *contrastado empíricamente* en distintas aplicaciones en casi todos los sectores del conocimiento: marketing, sanidad, producción, aplicaciones ambientales, planificación urbana, valoración, etc.

El método plantea formalizar la comprensión intuitiva de problemas complejos utilizando una estructura jerárquica, otra de las bases importantes del método, y de esta forma poder estructurar un problema de forma visual. La estructura jerárquica cuenta con al menos tres niveles básicos (meta u objetivo, criterios y alternativas), proporcionando una visión general del problema fácil de entender.

Tanto el método del SCORING como AHP parten de la base que el decisor deber establecer la importancia relativa de cada uno de los objetivos para luego definir una estructura de preferencias entre las alternativas. El resultado es una clasificación de las alternativas por orden de preferencia.

En líneas generales se puede decir que el Proceso Analítico Jerárquico se comporta de manera bastante eficaz con la evaluación de criterios subjetivos con posibles contradicciones entre los decisores.

En la asignación de pesos existen variedad de métodos, entre los cuales se encuentra AHP, que además de asignar pesos puede considerarse como un método estructurado de toma de decisión, tal y como se comentó anteriormente. La asignación de pesos es una consecuencia del método y la definición de prioridades se hace a través de una comparación pareada, planteamiento admitido en el ámbito científico.

AHP se posiciona como un método de bastante uso en la actualidad, empleándose de forma combinada con otros métodos y con la Lógica Difusa. Una aplicación muy útil del método es la posibilidad de determinar los coeficientes de la matriz de decisión cuando no se conocen estos valores (como consecuencia de carencia de datos o por incertidumbre), ya que es posible determinarlos sobre la base de las preferencias del decisor/es y en función de los criterios. Este motivo hace que en muchas ocasiones se integre con otros métodos, trabajando con los valores obtenidos con AHP como punto de partida del problema.

Generalizando, ya que se verán con mayor grado de detalle en el desarrollo de la presente tesis, los pasos que vienen definidos por el método son:

1. Modelar y/o descomponer el problema de decisión a resolver como una jerarquía cuyos elementos estén interrelacionados. Recuérdese que la estructura jerárquica cuenta con al menos tres niveles básicos (meta u objetivo, criterios y alternativas).
2. Después de definir los criterios se ponderan, es decir, se decide si todos ellos influyen de la misma forma en el interés de la alternativa o de forma distinta. Se utiliza para ello la “Matriz de Comparación por Pares” y la escala de Saaty [3].
3. Calculo de la consistencia de la “Matriz de Comparación por Pares”. Con ello se determina si los juicios de valor son consistentes o inconsistentes.

4. Cálculo del “Autovector o Vector Propio” de la matriz. Este dará el orden y/o ponderación de los criterios que van a permitir tomar la decisión.
5. Se normaliza el “Autovector”.
6. Se comparan las alternativas con respecto a cada criterio. Se plantea la matriz de comparación pareada de las alternativas para cada uno de los criterios.
7. Se calculan las consistencias.
8. Se calculan los autovectores.
9. Se normaliza.
10. De los pasos anteriores (del 2 al 5) se obtiene un vector propio de los criterios y un vector propio de las alternativas por cada criterio (pasos del 6 al 9) con lo que se implementa la matriz de vectores propios de las alternativas por criterio.
11. Para calcular las prioridades totales o finales de cada alternativa, lo que proporcionará el grado de importancia y/o peso de cada alternativa con respecto a la meta, Saaty [3] propone la utilización del método de la suma ponderada. Tal vez un método más sencillo que el utilizado por ELECTRE.

El método de la suma ponderada persigue encontrar el vector global de prioridades, que tiene como objetivo agregar la prioridades obtenidas en las jerarquía que se considere, la más básica con meta, criterios y alternativas.

$$V_i = \sum_{j=1}^n (W_j \cdot r_{ij}) \quad i = 1, 2, 3, \dots, m$$

Las diferentes componentes del vector V_i son las prioridades o pesos asociadas a cada alternativa A_i , es decir, ordenando este vector en base a los valores obtenidos se puede determinar cuál es la mejor alternativa.

Interpretando la expresión anterior, en la que w_j representa a los pesos asociados a cada uno de los criterios considerados y r_{ij} son los componentes de la matriz de valoración de las alternativas por cada criterio, el vector global se obtiene multiplicando dos matrices, la de los pesos asociados a cada uno de los criterios y la matriz de valoración de las alternativas.

En problemas con estructuras jerárquicas que cuentan con criterios y subcriterios hay que tener en cuenta el cálculo de las diferentes prioridades. En líneas generales se consideran tres tipos de prioridades:

- **Locales:** son las prioridades de los elementos que dependen de un mismo nodo o nodo común. Representan el peso relativo de los nodos dentro de cada grupo de hermanos con respecto a sus padres. Tanto las prioridades locales de cada grupo de criterios, como la de sus hermanos subcriterios (de cada criterio) suman 1.
- **Globales:** son la importancia de esos elementos respecto a la meta global fijada para el problema. Se calculan aplicando el principio de composición jerárquica, es decir, multiplicando los diferentes pesos que aparecen en el recorrido de la jerarquía, desde el elemento inferior hasta el objetivo y/o meta. En un mismo nivel, la suma de las prioridades globales de los diferentes criterios y/o subcriterios es 1.
- **Final y/o total de una alternativa:** se calcula agregando las prioridades globales obtenidas para esa alternativa en los diferentes caminos a que la unen con el objetivo y/o meta. El método empleado para la agregación, en AHP, suele ser el de la suma ponderada.

12. El análisis de sensibilidad se posiciona como el último paso del método y se realiza con el objetivo de confirmar la robustez de los resultados. Es común realizar un cambio en la prioridad de un criterio, manteniendo las proporciones de las prioridades del resto. Todos ellos, incluido el modificado, deben seguir sumando la unidad.

Un procedimiento común se basa en la realización de variaciones en el valor de un peso, no superiores al 10%, observándose cómo puede afectar el cambio al resto de los pesos y a la priorización de las alternativas.

Se incluye para mayor claridad, un ejemplo resuelto con AHP en anexo I.

3.5.9. Proceso Analítico en Red (ANP)

El Proceso Analítico en Red (ANP) o Analytical Network Process [71] [72] fue propuesto por el profesor Thomas L. Saaty en la década de los 90 y se trata de una generalización de AHP.

El método permite introducir relaciones de interdependencia y realimentación entre diferentes elementos que componen la estructura, algo que no permitía AHP. Cuando Saaty [3] propuso el método ANP explicaba que se trataba de un método sencillo que no

contemplaba determinadas características y que era preciso plantear una generalización de este modelo.

ANP no se plantea como una jerarquía sino como un modelo en red compuesto por una serie componentes, nodos o clusters en los que se agrupan elementos con características comunes, bien sean criterios o alternativas. Además, se contempla la realimentación en los clusters y la interdependencia entre clusters.

Generalizando, los pasos que componen el método son:

1. Definir los diferentes elementos de la red, es decir, alternativas y criterios.
2. Agrupar los diferentes elementos con características comunes en componentes, nodos o clusters.
3. Realizar el análisis de la red de influencias, matriz de dominación interfactorial. Un análisis de la red de influencias entre los diferentes elementos de los diferentes componentes.
4. Calcular los pesos y/o prioridades entre los diferentes elementos, supermatriz original. Prioridades entre elementos de la matriz de dominación interfactorial.
5. Calcular los pesos y/o prioridades entre clusters, supermatriz ponderada.
6. Calcular la supermatriz límite que define las prioridades entre todos los elementos que componen la red, es decir alternativas y criterios.

3.6. SOFTWARE PARA LA TOMA DE DECISIONES MULTICRITERIO

Existen en el mercado multitud de software, sobre los que no se profundizará, que dan soporte a la toma de decisiones multicriterio discreta y entre los que se encuentran el ELECTRE, PROMCALC, etc.

Para el caso del AHP se pueden encontrar productos como HIPRE3+, MPC, Expert Choice, etc.

Expert Choice (www.expertchoice.com), ha sido supervisado por Thomas Saaty, creador del método. El software permite realizar el análisis de sensibilidad, cuyo procedimiento se basa en la realización de variaciones en el valor de un peso, no superiores al 10%, observándose tanto gráfica como numéricamente cómo puede afectar el cambio al resto de los pesos y a la priorización de las alternativas.

3.7. SELECCIÓN DEL MÉTODO DE DECISION MULTICRITERIO

Con el objeto de poder valorar los métodos existentes del análisis multicriterio discreto y observar cómo se comportan estos en la práctica, para finalmente elegir el apropiado para el caso de estudio de la presente tesis, se realiza un repaso de los que se han considerado principales, desarrollando tres ejemplos prácticos que se entiende engloban a las más importantes familias de métodos (ver anexo I).

Con respecto a los métodos basados en relaciones de sobrecalificación y/o superación se desarrolla un ejemplo del ELECTRE I, base del resto de los métodos y primero de los publicados. Esta familia engloba, entre otros, ELECTRE I, II, III IV, IS y ELECTRE TRI, además del PROMETHEE.

Con respecto al “Método Lexicográfico” no se ha creído interesante el desarrollo de ningún ejemplo práctico, ya que se alejaba bastante del objetivo que se perseguía en la presente tesis.

En lo que respecta a los métodos típicamente compensatorios como son Ponderación Lineal (SCORING), Utilidad Multiatributo (MAUT), Proceso Analítico Jerárquico (AHP) y Proceso Analítico en Red (ANP), se han desarrollado ejemplos de:

- Ponderación Lineal, como ejemplo de éste y de MAUT. La razón es que el caso más sencillo de Utilidad Multiatributo es el aditivo, similar al método de Ponderación Lineal.
- Proceso Analítico Jerárquico, como ejemplo de éste y del Proceso Analítico en Red, que viene a ser una extensión de AHP.

Para que los diferentes métodos se usen en el mundo real, como es el caso, es necesario que tengan solidez y consistencia teórica y que puedan ser comprendidos y aplicados de forma cómoda y fácil. Por lo tanto, es fácil de comprender que los métodos más utilizados sean los que conceptualmente son más fáciles de entender y aplicar.

En resumen, existe una cierta carga subjetiva en la elección del método.

Por otro lado, existen también un conjunto de métodos para la ponderación y/o asignación de pesos que por norma general se emplean en determinadas etapas de los métodos del análisis multicriterio discreto y generalizando se pueden clasificar en:

1. Métodos de asignación directa.
2. Cálculo del autovector.

Recordando a Golany [24], éste hace referencia a dos métodos para determinar las prioridades y/o preferencias, los basados en el vector propio, como AHP, y los métodos extremos como mínimos cuadrados ponderados, mínimos cuadrados directos, etc.

Como se ha ido analizando con anterioridad, la estimación de los pesos lleva una fuerte carga subjetiva y aunque se pueden emplear diferentes procedimientos al sugerido por Saaty [3], que constituye la base metodológica multicriterio conocida como Proceso Analítico Jerárquico, resuelve algunas de las dificultades de otros métodos, según Romero [13].

En particular, en el método ELECTRE, uno de los inconvenientes que presenta es la gran carga subjetiva que lleva la determinación de los valores umbrales de concordancia y discordancia, por lo que se hace necesario realizar un análisis de sensibilidad sobre los citados umbrales. En el ejemplo desarrollado anteriormente se observa que una variación del valor umbral de concordancia haría desaparecer una de las alternativas.

En resumen, la estimación de los pesos lleva una fuerte carga subjetiva por lo que en la elección del método hay que valorar cómo se van a estimar los pesos, lo que influirá directamente sobre las soluciones del problema.

Para calcular las prioridades totales o finales de cada alternativa, lo que proporcionará el grado de importancia y/o peso de cada alternativa con respecto a la meta, Saaty [3] propone la utilización del método de la suma ponderada. Quizás método más sencillo que el utilizado en ELECTRE.

La introducción de una nueva alternativa puede hacer variar la estructura de preferencias del decisor, o poner de manifiesto alguna inconsistencia en los juicios.

La solución final a un problema de decisión multicriterio discreto, es decir, el orden final de las alternativas, puede estar más o menos influenciado por la asignación de pesos y/o preferencias, las normalizaciones, agregaciones, etc. que se dan en el proceso [13] [20].

Según la tipología de los problemas y de los datos tratados la influencia puede ser débil o fuerte:

- Si la influencia es débil la solución será robusta y consistente, no viéndose afectada por pequeños cambios.
- Si la influencia es fuerte la solución es influenciada por cualquier pequeña modificación en los datos

Todas estas influencias han de ser perfectamente conocidas por el decisor/es para poder experimentar con ellas hasta conseguir una calibración idónea.

Muchas de las actuales aplicaciones informáticas para MADM ya incorporan el análisis de sensibilidad de los pesos.

Por lo tanto, en la elección del método es necesario valorar el grado de influencia (fuerte o débil) de la asignación de pesos y/o preferencias, las normalizaciones, agregaciones, etc. sobre la solución final. Para comprobar la robustez del sistema final y/o poder ajustarlo es necesario realizar análisis de sensibilidad.

Según Romero [13], algunos métodos demandan información que en ocasiones resulta difícil de conseguir.

Por ejemplo, para ELECTRE hace falta conocer los umbrales de concordancia y de discordancia. La obtención de estos parámetros, tal y como se ha comentado anteriormente, lleva una importante carga subjetiva, lo que reduce de forma significativa la fiabilidad de los resultados obtenidos. Existen autores que han expuesto que en muchas aplicaciones del ELECTRE, y para los valores fijados previamente de los umbrales de concordancia y discordancia, el kernel está vacío o formado por todas las alternativas establecidas inicialmente. Por lo tanto, se deben ir graduando los umbrales hasta conseguir un kernel con el tamaño pretendido, teniendo también la determinación del tamaño final del kernel una significativa carga subjetiva.

Es evidente que en todos los métodos se pueden encontrar ventajas e inconvenientes.

CAPÍTULO 4

LA LÓGICA DIFUSA

Y

LOS MODELOS HÍBRIDOS

4. LA LÓGICA DIFUSA Y LOS MODELOS HÍBRIDOS

4.1. INTRODUCCIÓN A LA LÓGICA DIFUSA

La Lógica Difusa [7] [8] [9] es una metodología de Inteligencia Artificial, eficaz cuando se trabaja con imprecisión o ambigüedad, datos erróneos o ausencia de estos, algo a lo que los servicios de emergencias están acostumbrados. “Llueve mucho” y “hace mucho viento” son respuestas típicas dadas por los alertantes a los Centros 1-1-2.

Además, en meteorología se trabaja con conceptos imprecisos como posibilidad (definición aplicada a un fenómeno cuando la probabilidad de ocurrencia de éste está entre el 10% y 40%) y probabilidad (cuando está entre el 40% y 70%). Por otro lado, las predicciones meteorológicas se realizan utilizando modelos matemáticos que no siempre se cumplen, dada la complejidad de la atmósfera. A lo anterior hay que sumarle la singularidad de la geografía de Canarias, lo que se conoce como efectos locales, que los modelos utilizados no tienen en cuenta.

En resumen, se maneja mucha información y se toman muchas decisiones, que afectan directamente sobre la vida y los bienes de las personas, en un tiempo limitado; en un entorno de incertidumbre, imprecisión, ambigüedad y datos erróneos o ausencia de estos.

La Lógica Difusa utiliza la inferencia entre conjuntos difusos con un sistema de reglas. Un conjunto difuso A en un dominio D viene caracterizado por una función de pertenencia que asocia a cada elemento del dominio, un valor en el intervalo $[0, 1]$, lo que determina su grado de pertenencia al conjunto.

La diferencia principal entre conjunto y conjunto difuso es que para los conjuntos ordinarios la pertenencia de un elemento al conjunto es de todo o nada, sin embargo para el conjunto difuso se aceptan grados, es decir, cada elemento puede pertenecer con un cierto grado. Si la función de pertenencia toma valores próximos a cero se indica poca pertenencia por parte del elemento al conjunto y valores próximos a 1 indican una alta o elevada pertenencia.

Un conjunto difuso se encuentra asociado a un valor lingüístico que está definido por una palabra, etiqueta lingüística o adjetivo.

Por otro lado, se puede definir la granularidad de la incertidumbre [10] como el nivel de distinción entre los distintos niveles de incertidumbre contenida en las variables lingüísticas, de forma que se pueda representar correctamente la distinción que desea el usuario. En una granularidad baja el dominio está poco dividido y existen pocos niveles de distinción de la incertidumbre, mientras que en una granularidad alta el dominio está muy dividido, lo que puede provocar un aumento de la complejidad en la descripción del dominio. Es necesario llegar siempre a un equilibrio.

La lógica difusa se fundamenta en el concepto de que todo es cuestión de grado, lo cual permite manejar información vaga o de difícil especificación, importante para la resolución de un problema, por medio de una serie de reglas aprendidas con sistemas adaptativos que se nutren de la observación de las personas o de la formulación por parte del experto humano.

El aspecto central de las técnicas de lógica difusa es que, a diferencia de la lógica clásica, la lógica difusa tiene la capacidad de reproducir de manera aceptable y eficiente los modos usuales del razonamiento humano, al tener en cuenta que la certeza de una proposición es una cuestión de grado. Por esta razón, parte de la base del razonamiento aproximado y no del razonamiento preciso como lo hace la lógica clásica. De esta forma, las características más importantes de la lógica difusa son: la flexibilidad, la tolerancia con la imprecisión, la capacidad para moldear problemas no-lineales y su fundamento en el lenguaje del sentido común, entendido como un compendio de conocimientos compartidos y/o consensuados.

4.2. ESTRUCTURA BÁSICA DE UN SISTEMA EXPERTO BASADO LÓGICA DIFUSA

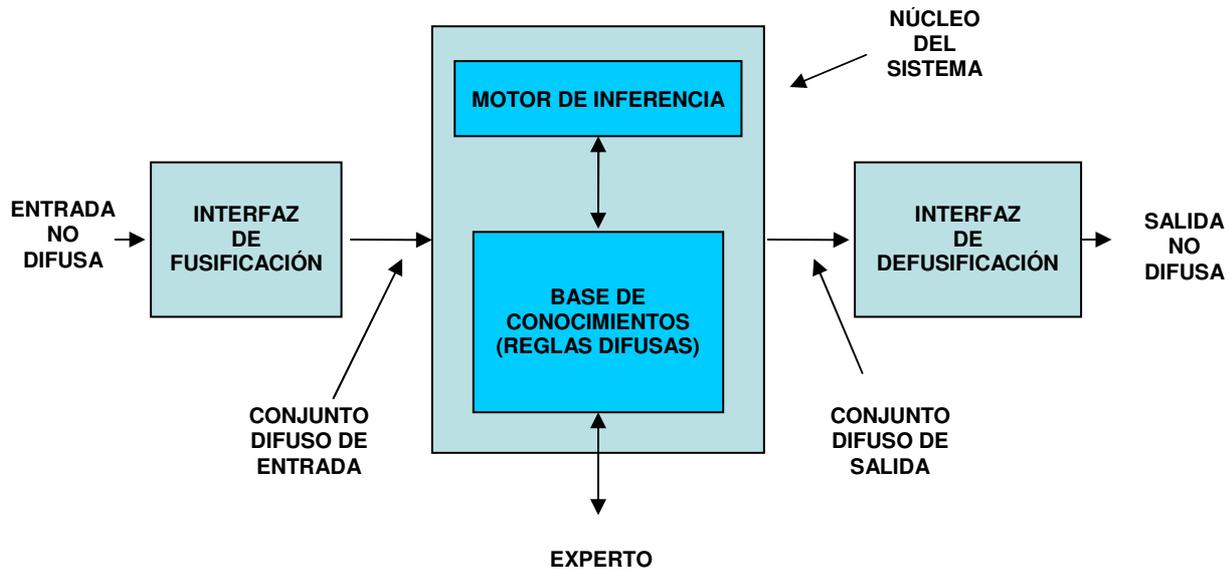


Figura 4: Sistema experto genérico basado en un motor de inferencia en Lógica Difusa [7] [8]

Un sistema básico cuenta con:

- **Interfaz de fusificación:** transforma las variables de entrada en variables difusas. Se deben de tener definidos los rangos de variación de las variables de entrada y los conjuntos difusos asociados con sus respectivas funciones de pertenencia.
- **Base de conocimientos (reglas difusas):** contiene las reglas lingüísticas del control y la información referente a las funciones de pertenencias de los conjuntos difusos. Así mismo contiene el conocimiento especializado extraído del experto en el dominio. El método usado para representar el conocimiento es mediante reglas de inferencia. El dominio de conocimiento representado se divide, pues, en pequeñas fracciones de conocimiento o reglas. Las reglas se almacenan en una secuencia jerárquica lógica, pero esto no es estrictamente necesario. Se pueden tener en cualquier secuencia y el motor de inferencia las usará en el orden adecuado que necesite para resolver un determinado problema.
- **Motor de inferencia:** realiza la tarea de calcular las variables de salida a partir de las variables de entrada, mediante las reglas del controlador e inferencia difusa, entregando conjuntos difusos a la salida.
- **Interfaz de defusificación:** proporciona salidas discretas y deterministas a partir de los conjuntos difusos obtenidos como resultado de la inferencia.

Y funciona de la siguiente manera:

Los datos de entrada se fusifican para ser tratados por el núcleo del sistema. La fusificación convierte valores reales en valores difusos.

En el núcleo del sistema, donde se encuentra la base de conocimiento en forma de reglas extraídas de los expertos, se selecciona una respuesta en base a la entrada ya fusificada.

El motor de inferencia realiza la tarea de calcular las variables de salida, a partir de las variables de entrada aplicando las reglas y la inferencia difusa, entregando conjuntos difusos de salida.

Finalmente, la respuesta se prepara, se desfusifica y se obtienen valores reales a partir de la función de pertenencia de un conjunto difuso.

4.3. MODELOS HÍBRIDOS

Los métodos clásicos resultan ineficientes cuando se trata con problemas de decisión complejos o las características determinan la utilización combinada de métodos con el fin de aprovechar las ventajas que puedan aportar cada uno de ellos.

En los trabajos de García [14] y Mellinas [35], se utilizan dos métodos de decisión multicriterio: AHP para la obtención del peso de los criterios y el método TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) para la evaluación de las alternativas.

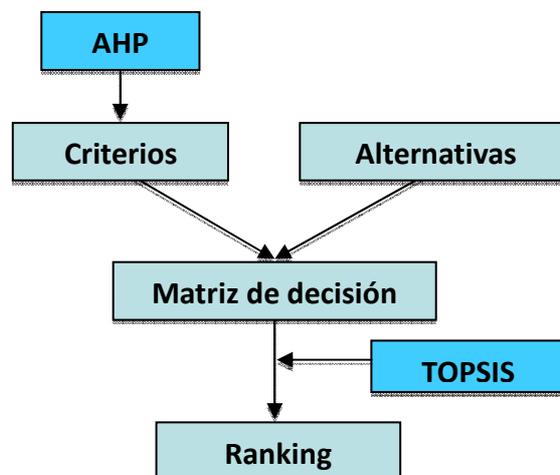


Figura 5: Modelo híbrido [14] [35]

También se combina la Lógica Difusa con métodos de decisión multicriterio en Fuzzy TOPSIS o Fuzzy AHP [11].

En la presente tesis se utiliza Fuzzy AHP [11] y se propone una novedosa variación del método destinada a simplificar los cálculos con conjuntos difusos y hacer que la detección de errores sea mucho más fácil. Primero se aplica AHP para extraer el conocimiento de los expertos y después se fusifica ese conocimiento.

4.4. METODOLOGÍA DE VALIDACIÓN DEL SISTEMA

4.4.1. Error cuadrático medio normalizado y sesgo fraccional

Existen varios métodos disponibles para la evaluación de la calidad de los modelos entre los que se encuentran el error cuadrático medio normalizado (ECMN) y el sesgo fraccional (SF), utilizados por Rew y otros [54], y posteriormente por Muñoz y otros [55].

Dados n valores observados (X_0) y los correspondiente previstos (X_p) se tienen:

$$ECMN = \frac{1}{n} \sum_1^n \frac{(X_0 - X_p)^2}{X_0 X_p}$$

$$SF = \frac{2}{n} \sum_1^n \frac{(X_0 - X_p)}{(X_0 + X_p)}$$

Con el ECMN se mide la precisión del modelo propuesto frente al actual. Cuanto menor es el valor del ECMN este es más preciso.

Con el SF se observa la tendencia del modelo a sobreestimar o subestimar.

4.4.2. Test de Wilcoxon

El Test de Wilcoxon es una prueba no paramétrica utilizada para comparar la mediana de dos muestras relacionadas y determinar si existen diferencias entre ellas. Se utiliza como alternativa a la prueba t de Student cuando no se puede suponer la normalidad de las muestras. Debe su nombre a Frank Wilcoxon que la publicó en 1945 [56].

Cuando se tiene una muestra de n pares de valores denominados (X_i, Y_i) se procede de la forma siguiente:

- Se establece la hipótesis nula (H_0): si las diferencias proceden de una distribución simétrica en torno a cero los valores de W^+ y W^- son similares o próximos.
- Para verificar la hipótesis nula primero se calculan las diferencias ($X_i - Y_i$) y se eliminan las nulas. Se ordenan las diferencias en valores absolutos $|Z_1|, \dots, |Z_n|$ y se asigna un rango R_i . Si alguno de los valores se repite se calcula el rango medio.
- Se suman los rangos de las diferencias positivas o la suma de los rangos correspondientes a los valores positivos de Z_i .

$$W^+ = \sum_{Z_i > 0}^{Z_n} R_i$$

- Se suman los rangos de las diferencias negativas o la suma de los rangos correspondientes a los valores negativos de Z_i .

$$W^- = \sum_{Z_i < 0}^{Z_n} R_i$$

- Si los valores de W^+ y W^- no son similares se rechaza la hipótesis nula.
- Si los valores de W^+ y W^- son iguales, se acepta la hipótesis nula.

4.5. ESTADO DEL ARTE.

Se ha realizado una introducción a los sistemas expertos (capítulo 2) y a una estructura básica de un “Sistema Experto basado en Reglas”. También se ha realizado un recorrido por los principales métodos de decisión multicriterio (capítulo 3), planteando y resolviendo ejemplos (ver anexo) de los que se han considerado más importantes para el objeto de la presente tesis.

Por otro lado se ha incluido una introducción a la Lógica Difusa y a una estructura básica de un “Sistema Experto basado en Lógica Difusa” y se ha descrito lo que es un modelo híbrido (capítulo 4).

Aunque la bibliografía es extensa, se han seleccionado algunos trabajos representativos mostrados a continuación, que ayudan a tener una idea de las aplicaciones existentes en las diferentes áreas del conocimiento.

Ref. bibliográfica	Área	Título	Resumen
[14]	Electrónica y tecnología de computadoras y proyectos.	<i>Métodos para la comparación de alternativas mediante un Sistema de Ayuda a la Decisión (S.A.D.) y “Soft Computing” Sistema híbrido AHP, TOPSIS Fuzzificado.</i>	Se plantea la evaluación de alternativas en el ámbito del “Soft Computing” y dado que los métodos clásicos resultan ineficientes para problemas de decisión complejos, sobre todo para los casos en los que sólo se dispone de información cualitativa, se propone un sistema híbrido. Este sistema recoge las fortalezas de cada una de los métodos clásicos utilizados. Aporta una herramienta de ámbito general mediante un sistema de ayuda a la decisión (SAD) para ayudar a modelizar distintos tipos de problemas, como podrían ser la selección de personal, de proyectos, etc. En particular se desarrolla un SAD para el modelado del problema del ranking de universidades en el ámbito de la Ingeniería Industrial.
[15]	Generación eléctrica.	<i>Análisis comparativo de Técnicas de Generación Eléctrica; AHP y Topsis Fuzzificado. Sistema híbrido AHP, TOPSIS Fuzzificado.</i>	Se plantea explorar la idea del uso de los métodos de decisión multicriterio en el campo energético, para ayudar en la elección de la mejor o más adecuada técnica de generación eléctrica en una zona de la Región de Murcia.
[37]	Infraestructura urbana: Selección de proyectos de infraestructura en Palestina	<i>Strategic implementation of infrastructure priority projects: Case study in Palestine Sistema híbrido AHP y Delphi</i>	Se desarrolla una estrategia para la implementación y gestión de proyectos de infraestructuras urbanas mixtas en Palestina. Para la priorización de proyectos se utiliza AHP, que basa su análisis en las prestaciones del proyecto, el ciclo de vida y las directrices de aplicación. Para la obtención de la opinión de los expertos se ha utilizado una variación de la técnica Delphi, análisis de escenarios, obras civiles y las recomendaciones de la industria nuclear. AHP, para este caso, permite considerar factores objetivos y subjetivos para obtener el orden de prioridad de los proyectos de infraestructura. Además, permite incorporarla incertidumbre en el proceso.

Ref. bibliográfica	Área	Título	Resumen
[38]	Gestión de compras.	<i>Applying environmental criteria to supplier assessment: A study in the application of the Analytical Hierarchy Process AHP</i>	Se pretende integrar características medioambientales, además de las puramente estratégicas, en la toma de decisiones de los jefes de compras. En este estudio se expone la aplicación de AHP como un modelo de soporte de decisiones para ayudar a comprender las ventajas y desventajas entre las dimensiones ambientales. Se demuestra como AHP se puede utilizar para evaluar la importancia relativa de los distintos rasgos ambientales y como evaluar el rendimiento relativo de varios proveedores a lo largo de estos rasgos. Se realizaron tres estudios de casos para demostrar las ventajas y debilidades de la utilización de AHP. Por último se analiza cómo AHP puede ser incorporado en un sistema de información integral de soporte de compras ambientalmente consciente (ECP).
[39]	Energías renovables: Estudio de viabilidad usando métodos multicriterio con el fin de priorizar fuentes de energía renovable viables.	<i>Pre-feasibility MCDM tools to aid communities in prioritizing local viable renewable energy sources Sistema híbrido AHP y SIMUS</i>	<p>La integración de fuentes de energía renovables con fuentes convencionales de combustible aumenta la seguridad energética, reduciendo al mínimo la dependencia de fuentes de energía importadas. Además minimiza el impacto ambiental negativo así como las implicaciones para la salud de las personas.</p> <p>Las alternativas que existen tienen ventajas y limitaciones, lo que ocasiona que el proceso de decidir qué tipo de fuente de energía renovable se pueda implementar en un lugar específico sea un problema a resolver.</p> <p>Las dos herramientas de análisis utilizadas para este trabajo han sido:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. El proceso analítico jerárquico (AHP) para la participación comunitaria en el proceso de toma de decisiones a través de la recopilación de datos y la obtención de las opiniones de expertos, en el que los datos son subjetivamente ponderados para llegar a una clasificación de alternativas. 2. El modelo interactivo secuencial para la sostenibilidad urbana (SIMUS). SIMUS, por el contrario, utiliza la manipulación matemática de programación lineal, que también y principalmente se basa en la obtención de opiniones de los expertos. <p>El artículo aborda la aplicación de ambas herramientas para ayudar a las comunidades en el ranking de viabilidad. Ambas demuestran su eficacia.</p>

Ref. bibliográfica	Área	Título	Resumen
[40]	Análisis DAFO.	<p data-bbox="667 416 1028 676"><i>Utilizing the analytic hierarchy process (AHP) in SWOT analysis — a hybrid method and its application to a forest-certification case</i> Sistema híbrido AHP y DAFO</p>	<p data-bbox="1055 256 2033 794">El análisis DAFO, también análisis FODA, se trata de una metodología para el estudio de la situación de un proyecto o una empresa. Se analizan las características internas, “Debilidades y Fortalezas” y las externas, “Amenazas y Oportunidades”. El presente estudio analiza un método híbrido para mejorar el uso de DAFO. AHP y su modelo de cálculo de prioridades se integran con el análisis DAFO. El objetivo de la aplicación del método híbrido es mejorar la base de información cuantitativa de los procesos de planificación estratégica mediante el uso de AHP. El método híbrido se puso a prueba en relación con un caso de estudio finlandés sobre la certificación forestal. En el caso de estudio, se presentaron los resultados de una manera ilustrativa mediante la utilización de la información cuantitativa lograda por el método híbrido. Las comparaciones por pares necesarios se mostraron útiles ya que obligaban a pensar sobre los pesos de los factores y analizarla situación con mayor precisión y profundidad.</p>
[41]	Política y economía forestal.	<p data-bbox="689 991 1010 1203"><i>The use of Analytic Hierarchy Process to incorporate stakeholder preferences into regional forest planning</i> AHP</p>	<p data-bbox="1055 879 2033 1321">Las decisiones en el ámbito forestal a menudo se caracterizan por la complejidad, incertidumbre e irreversibilidad. La complejidad surge de los múltiples usos de los bienes y servicios forestales, dificultad en la valoración económica de los servicios ecológicos y participación de diferentes y variados actores. Los métodos convencionales, tales como el análisis de costo-beneficio, son poco adecuados para evaluar las decisiones en el ámbito forestal. El objetivo de este trabajo es examinar el alcance y la viabilidad de la AHP en la incorporación de preferencias de los interesados en la planificación forestal. El programa regional australiano, “Acuerdo Bosque”, se toma como un caso ilustrativo para el análisis. Los resultados muestran que AHP puede formalizar la participación pública en la toma de decisiones y aumentar la transparencia y la credibilidad del proceso.</p>

Ref. bibliográfica	Área	Título	Resumen
[42]	Modelización matemática y computación	<i>Using AHP in patent valuation AHP</i>	Los activos intangibles incluyen el capital intelectual y la propiedad intelectual. La propiedad intelectual es a menudo protegida por patentes. Dado que las empresas están dispuestas a pagar los costes de las patentes, sería útil poder determinar cuándo vale la pena. Se propone un sistema de puntuación objetiva para las patentes de propiedad intelectual desde el lado emisor de la licencia en este estudio utilizando AHP. El método se usa para valorar las patentes de nuevos productos que se están desarrollando por una empresa real.
[43]	Política energética.	<i>Agricultural biogas plants – A systematic analysis of strengths, weaknesses, opportunities and threats Sistema híbrido AHP y DAFO</i>	Se discuten las perspectivas de las plantas agrícolas de biogás. Se ha llevado a cabo un análisis integrado DAFO/AHP para las plantas en Austria, con la finalidad de identificar fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas y ponderar los criterios/factores identificados en base a las opiniones de los expertos, calculados a través de AHP. Los resultados muestran que los aspectos financieros dominan entre las cuatro categorías DAFO y aspectos relativos a la tecnología parecen tener menor importancia. Los criterios/factores que no están directamente bajo el control de los operadores de plantas se perciben como cruciales. Se llega a la conclusión de que estas plantas sólo tendrán éxito en la contribución a los objetivos de suministro de energía sostenible cuando las condiciones económicas y políticas sean favorables a largo plazo.
[44]	Energía nuclear.	<i>Multicriteria decision analysis based on analytic hierarchy process in GIS environment for siting nuclear power plant in Egypt Sistema híbrido AHP y GIS</i>	Debido a la creciente demanda de energía eléctrica y de agua dulce en Egipto se propone la energía nuclear como una alternativa que podría ser viable. A medida que transcurre el tiempo son menos los lugares disponibles y adecuados para el desarrollo de plantas de energía nuclear. La elección del lugar es una fase clave en el proceso de ubicación de una central y puede afectar significativamente a la seguridad y coste de la instalación durante su ciclo de vida. El emplazamiento es uno de los problemas en la que sus múltiples criterios a la hora de tomar una decisión lo hacen que sea bastante complejo. Seis limitaciones y veintidós factores correspondientes a la seguridad, al medio ambiente y al entorno socio-económico y se han considerado en el estudio. AHP se utilizó para seleccionar el lugar adecuado.

Ref. bibliográfica	Área	Título	Resumen
[46]	<p>Emergencias.</p> <p>Sistemas expertos con aplicaciones.</p>	<p><i>Evaluating emergency response capacity by fuzzy AHP and 2-tuple fuzzy linguistic approach.</i></p>	<p>Se pretende evaluar la capacidad de respuesta en emergencias mediante Fuzzy AHP y un enfoque difuso de 2-tuplas lingüísticas. Como consecuencia de la presión del tiempo, la falta de experiencia y de datos, los expertos suelen trabajar con criterios cualitativos en la forma de variables lingüísticas. Este artículo presenta un método híbrido difuso que consiste en utilizar Fuzzy AHP y un enfoque difuso de 2-tuplas lingüísticas (haciendo uso de la representación de 2-tuplas lingüísticas se consigue una representación más flexible de las funciones de pertenencia que permite realizar un desplazamiento lateral de las mismas) para evaluar la capacidad de respuesta en la gestión de las emergencias. El estudio se ha realizado en tres etapas:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Se presenta una jerarquía del sistema de índice de evaluación de la capacidad de respuesta en emergencia. 2. Se utiliza Fuzzy AHP para analizar la estructura del problema y evaluar la capacidad de respuesta en emergencia. Mediante uso de variables lingüísticas se hacen comparaciones por pares para los criterios y subcriterios para determinar los pesos. 3. Los rating de los subcriterios se evalúan mediante valores lingüísticos representados por números difusos triangulares para expresar la evaluación cualitativa de las opiniones subjetivas de los expertos y posteriormente los valores lingüísticos se transforman en 2-tuplas. <p>Se utiliza la 2-tupla lingüística para calcular las calificaciones de los criterios y la capacidad de respuesta en emergencias, valorando la mejor alternativa. Se demostró la validez del enfoque propuesto por medio de la comparación de la capacidad de respuesta de emergencia en tres casos.</p>

Ref. bibliográfica	Área	Título	Resumen
[47]	Emergencias. Contaminación ambiental pos accidente químico	<i>Construction of a technique plan repository and evaluation system based on AHP group decision-making for emergency treatment and disposal in chemical pollution accidents</i>	<p>La contaminación ambiental ocasionada por accidentes químicos es cada vez más preocupante, siendo vital conocer con antelación la tecnología de tratamiento y eliminación de contaminantes más apropiada. Por otro lado, la elaboración de un plan de emergencia para este tipo de accidentes entraña su dificultad, como consecuencia de la incertidumbre y complejidad que entraña. Se crearon 54 escenarios diferentes para los accidentes de contaminación química, basados en el medio contaminado, características y propiedades de las sustancias químicas involucradas. Para cada tipo de accidente se estableció el tratamiento de emergencia y tecnología de eliminación viable. El sistema de índice de evaluación técnica fue desarrollado en base a la mejora para la toma de decisiones en grupo con AHP, siendo probado en un repentino accidente de contaminación con anilina que se produjo en un río en diciembre de 2012.</p>
[45]	Emergencias. Sistemas expertos con aplicaciones.	<i>Emergency alternative evaluation under group decision makers: A method of incorporating DS/AHP with extended TOPSIS</i> <i>Sistema híbrido DS/AHP con TOPSIS</i>	<p>Seleccionar la mejor alternativa es vital en emergencias. En el proceso de evaluación de los diferentes problemas que se dan existe información incompleta e incierta y los tomadores de decisiones no pueden expresar fácilmente sus opiniones con valores exactos y nítidos. La teoría Dempster-Shafer (DST) es adecuada para hacer frente a este tipo de problemas. En este trabajo, el DS/AHP y el método TOPSIS extendido pretenden resolverlos citados problemas.</p>

Tabla 6: Tabla resumen con referencias bibliográficas sobre trabajos realizados relacionados con el método AHP.

CAPÍTULO 5

MATERIALES Y MÉTODOS

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. MODELO HÍBRIDO: SISTEMA EXPERTO EN LA TOMA DE DECISIONES BASADOS EN METODOLOGÍAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL (LÓGICA DIFUSA COMBINADA CON AHP)

Tal y como se ha comentado anteriormente, los métodos clásicos resultan poco eficientes en problemas de decisión como el que se trata y resulta interesante la utilización de métodos y/o modelos donde se combinen las ventajas que puedan aportar cada uno de ellos por separado. De este modo, se plantea un modelo híbrido que da soluciones a los problemas ya explicados en el capítulo 1 apartado 1.2. y que vienen dadas por:

1. Seleccionar a un conjunto de expertos, especialistas en seguridad y emergencias con un alto grado de conocimiento en el PEFMA [1] y FMA. Para la selección se aplica el “Coeficiente de Competencia Experta” o “Coeficiente K” [50] [51].
2. Utilizar el método AHP, propuesto por Saaty [3] [4] [5] [6], para recoger el conocimiento de los expertos, dando consistencia a los juicios a la vez de soporte matemático. Se genera una base de conocimientos y se evita que la toma de decisiones pierda objetividad porque venga influenciada por el conjunto de expertos que se encuentre de turno. Además, se puede introducir nuevo conocimiento y se evita que desaparezca cuando los expertos se jubilan o dejan de trabajar en el sector. Por último, AHP está cerca de un lenguaje Fuzzy por lo que es ideal para trabajar con la Lógica Difusa.
3. Utilizar la Lógica Difusa [7] [8] para trabajar con la imprecisión o ambigüedad, datos erróneos o ausencia de estos y poder comprender y funcionar con las expresiones de los seres humanos. Se construyen funciones de pertenencia para poder evaluar las alternativas posibles en cada momento (declaraciones de prealerta, alerta o alerta máxima). El grado de pertenencia a determinada función es lo que el sistema utilizará para proponer la alternativa idónea.
4. Variar la tradicional metodología AHP Fuzzy [11] para simplificar los cálculos con los conjuntos difusos y aplicar AHP para después fusificar. La interpretación de los datos de entrada al emplear AHP Fuzzy se dificulta.
5. Gestionar la gran cantidad de información en un corto lapso de tiempo, automatizando todo el proceso mediante un sistema experto basado en reglas [5], en

el que la base de conocimiento ha sido generada mediante AHP y el motor de inferencia se basa en Lógica Difusa [58].

5.1.1. Motivaciones para la elección del Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

Tal y como se ha comentado, según Barba Romero [20], existe una comprensible tendencia a utilizar procedimientos que exijan lo mínimo posible del decisor.

Por otro lado y para que los diferentes métodos se usen en el mundo real, como es el caso, es necesario que tengan solidez y consistencia teórica y que puedan ser comprendidos y aplicados de forma cómoda y fácil. Por lo tanto, parece evidente que los métodos más utilizados sean los que conceptualmente son más fáciles de entender y aplicar, lo que añade cierta subjetividad a la elección.

Para seleccionar el método idóneo, y reducir subjetividad en la elección, se han analizado y valorado los que se consideraron principales métodos del análisis multicriterio discreto (ver capítulo 3). También se desarrollaron tres ejemplos prácticos con un enfoque al sector de la “Seguridad y Emergencias” (ver anexo I), ámbito en el que se desenvuelve esta tesis, lo que ayudó a elegir el método que mejor se adapta a las necesidades planteadas.

Las ventajas que han llevado a la elección de AHP son:

- Permite analizar un problema por partes:

AHP proporciona algunas ventajas respecto a otros métodos, destacando su simplicidad y claridad, siendo una estructurada metodología de trabajo que se basa en la descomposición de un problema en una disposición jerárquica

Permite formalizar la comprensión intuitiva de problemas complejos utilizando una estructura jerárquica, una de las bases importantes del método, y de esta forma poder estructurar un problema de forma visual. La jerarquía cuenta con al menos tres niveles básicos (meta u objetivo, criterios y alternativas), proporcionando una visión general del problema fácil de entender.

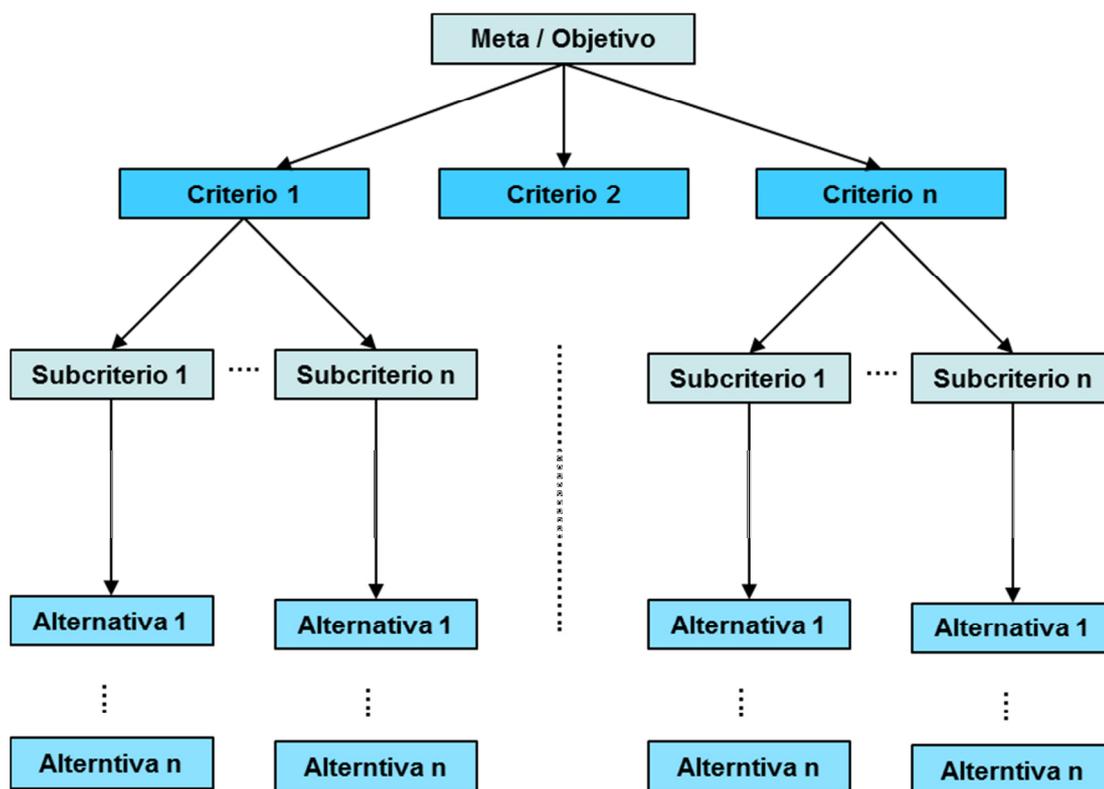


Figura 6: .Estructura jerárquica AHP con 4 niveles (elaboración propia).

- Se adapta a la mente humana:

Se acerca bastante a la comprensión de la mente humana ya que permite, para el caso planteado, extraer el conocimiento de los expertos mediante preguntas fáciles de comprender y responder. Los fundamentos psicológicos en los que se apoya el método se basan en observaciones de psicólogos de finales del siglo XIX y principios del XX, mediante las que se determina que la mente humana está bien diseñada para la comparación por pares, es decir, comparar elementos de dos en dos. Sin embargo, se comporta de peor manera con las comparaciones globales.

En base a lo expuesto, el método desarrolla una escala de comparación que permite las comparaciones por pares entre elementos (ver capítulo 3 punto 3.5.8).

- Presenta sustento matemático:

Es un método que tiene solidez matemática y permite valorar las consistencias de los juicios de valor de los expertos, recogidos mediante matrices de comparación por pares, planteamiento este admitido en el ámbito científico.

La matriz de comparaciones pareadas [19] es una matriz cuadrada $n \times n$ que contiene comparaciones de criterios, subcriterios y alternativas.

El elemento a_{ij} de la matriz representa la preferencia del criterio, subcriterio o alternativa de la fila i cuando se compara con criterio, subcriterio o alternativa de la columna j .

Sea $i = \{1, 2, \dots, n\}$ y $j = \{1, 2, \dots, n\}$ se cumple que $\forall i = j \Rightarrow a_{ij} = 1$ pues se está comparando consigo mismo. Por otro lado:

$$\text{Si } A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow a_{ij} * a_{ji} = 1 / A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

En la matriz A , $\forall i, j$ se cumple que $a_{ij} > 0$.

Tal y como se comentó anteriormente, los elementos con los que trabaja el método son fundamentalmente matrices y estas deben cumplir una serie de características, entre las que se encuentran:

1. Reciprocidad: si A es una matriz de comparación pareada se cumple:

$$a_{ij} = x \Rightarrow a_{ji} = \frac{1}{x} \quad \forall x / \frac{1}{9} \leq x \leq 9$$

2. Homogeneidad:

Si los elementos i y j son considerados igualmente importantes entonces $a_{ij} = a_{ji} = 1$ además $a_{ii} = 1 \quad \forall i$

3. Consistencia:

Se satisface que $a_{ik} = a_{ij} * a_{jk} \forall i, j, k = \{1, 2, \dots, n\}$

- AHP proporciona un método que mide la consistencia de las opiniones de los expertos de tal forma que:
 - Si la matriz es inconsistente, se deben replantear las opiniones de los expertos. Si no es posible reconducir el grado de inconsistencia a valores aceptables, las opiniones serán eliminadas del proceso. Hay que tener en cuenta que tratando con juicios de seres humanos la inconsistencia nula es muy difícil de conseguir.
 - Si la matriz es consistente se puede continuar con el proceso.

- La asignación de pesos es intrínseca al método lo que facilita su aplicación:

Con respecto a la asignación de pesos existe variedad de métodos (ya se analizó la problemática que subyace en ellos), entre los cuales se encuentra AHP, que además de asignar pesos puede considerarse como un método estructurado de toma de decisión.

Para este método no se precisa una asignación de pesos a priori sino que es una consecuencia de su aplicación. El establecimiento de prioridades se hace a través de una evaluación por pares.

El cálculo del autovector proporciona el orden de prioridades de las matrices de pares y se basa en:

Si se tiene la matriz de comparaciones pareada $A =$

$$\begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Se multiplica por ella misma obteniendo la matriz $B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{nn} \end{bmatrix}$

Se suman las filas de la matriz B $\begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n b_{1j} \\ \sum_{j=1}^n b_{2j} \\ \dots \\ \dots \\ \sum_{j=1}^n b_{nj} \end{bmatrix}$

Se normaliza por la suma $\sum_{j=1}^n (b_{1j} + b_{2j} + \dots + b_{nj})$ y se obtiene el autovector $P = \begin{bmatrix} P_{11} \\ P_{21} \\ \dots \\ \dots \\ P_{n1} \end{bmatrix}$

- El proceso de normalización es sencillo: normalización por la suma.
- También el cálculo de prioridades totales o finales resulta sencillo:

Para calcular las prioridades totales o finales de cada alternativa, lo que proporciona el grado de importancia y/o peso de cada alternativa con respecto a la meta, Saaty [3] propone la utilización del método de la suma ponderada.

El método de la suma ponderada persigue encontrar el vector global de prioridades que tiene como objetivo agregar las prioridades obtenidas en las jerarquía que se considere, la más básica con meta, criterios y alternativas.

$$V_i = \sum_{j=1}^n (W_j \cdot r_{ij}) \quad i = 1, 2, 3, \dots, m$$

W_j representa los pesos asociados a cada uno de los criterios considerados y r_{ij} los componentes de la matriz de valoración de las alternativas por cada criterio.

El vector global se obtiene multiplicando dos matrices, la de los pesos asociados a cada uno de los criterios y la matriz de valoración de las alternativas.

Los diferentes componentes del vector V (V_i) son las prioridades o pesos asociadas a cada alternativa A_i , es decir, ordenando este vector en base a los valores obtenidos se puede determinar cuál es la mejor.

- Se comporta de manera eficaz con la evaluación de criterios subjetivos con posibles contradicciones entre expertos. No incita ni obliga al consenso y permite agregar los diferentes opiniones mediante la media geométrica.
- Permite replantear fácilmente y ajustar los juicios de valor o preferencias repitiendo el proceso.
- Es un método que se suele emplear de forma combinada con otros métodos y con la Lógica Difusa. Una aplicación muy útil es la posibilidad que tiene para determinar los coeficientes de la matriz de decisión cuando no se conocen estos valores (como consecuencia de carencia de datos, ambigüedad o incertidumbre), ya que es posible determinarlos sobre la base de las preferencias del decisor/es y en función de los criterios. Este motivo hace que en muchas ocasiones se integre con otros métodos, trabajando con los valores obtenidos con AHP como punto de partida del problema (modelos híbridos).
- Uno de los últimos pasos del método AHP contempla la posibilidad de realizar un análisis de sensibilidad, que corrobora que los resultados obtenidos son sólidos y no consecuencia de la casualidad. El procedimiento se basa en realizar cambios en el valor de un peso, no superiores al 10%, con el fin de observar si el cambio afecta al resto del problema y a la priorización de las alternativas.

5.1.2. Aplicación del Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

Los pasos aplicados definidos por el método han sido:

5.1.2.1. La selección de expertos.

Aunque este paso no viene definido en AHP se ha creído interesante añadirlo como paso previo a la aplicación del método, ya que se trata de un problema común en todos los métodos de análisis multicriterio discreto.

Se utiliza el “Coeficiente de competencia experta” o “Coeficiente K”, visto en el capítulo 3, para la selección de expertos.

En relación a la cantidad de expertos ya se ha comentado que la bibliografía especializada no aporta conclusiones del todo exactas, pudiéndose encontrar diferentes criterios.

Para el caso planteado, se confeccionó una primera lista con 20 expertos, que eran todos los disponibles. Se eligieron a todas las personas que de forma habitual participan en la gestión de un FMA con activación del PEFMA. El grupo se completó con cuatro personas más sin experiencia general en el sector de la Seguridad y Emergencias, sin experiencia específica en el problema propuesto y sin preparación general. El objetivo fue verificar las posibles desviaciones del método por contraste.

El “Coeficiente K” ayuda a seleccionar a los expertos más idóneos en el problema propuesto, alejándonos de la arbitrariedad y subjetividad. Las opiniones serán evaluadas por la metodología AHP, que analiza la consistencia de los juicios de valor emitidos por éstos.

Se adaptaron al caso de estudio, las encuestas y puntuaciones usualmente utilizadas para la valoración de las fuentes de conocimiento, de acuerdo con los diferentes autores que han desarrollado el procedimiento y/o método (ver capítulo 3).

A los 20 expertos seleccionados se les realizaron las siguientes encuestas (adaptadas) para la obtención del “Coeficiente K”:

1. Marque el grado de conocimiento que posee sobre: el PEFMA, la Meteorología y los FMAs. Se valora de 0 a 10, teniendo en cuenta que el valor 0 se asocia a la ausencia de conocimiento y 10 al máximo conocimiento e información.

Valoración sobre su nivel de competencia o conocimiento del problema que se está analizando.									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Tabla 7: Autoevaluación del experto sobre el grado de conocimiento del problema.

2. Autoevalúe el grado de influencia que han tenido cada una de las fuentes de conocimiento que se le plantean y/o el papel que han desempeñado en la adquisición de los conocimientos, es decir, de donde proceden sus conocimientos. Marque con una X su elección.

Se restó subjetividad al proceso acotando, las tres primeras fuentes de conocimiento, mediante parámetros fácilmente medibles.

Fuentes de conocimiento	Grado de influencia de las diferentes fuentes de conocimiento		
	Alto	Medio	Bajo
Experiencia general en el sector de la Seguridad y Emergencias.	Más de 5 años	De 3 a 5 años	De 0 a 3 años
Experiencia profesional específica en el problema propuesto.	Más de 5 años	De 3 a 5 años	De 0 a 3 años
Preparación general.	Grado en Seguridad y Control de Riesgos o titulaciones relacionadas.	Diplomas profesionales de Coordinador Multisectorial, Gestor Operativo o Gestor de Recursos.	Otras titulaciones.
Sentido de la responsabilidad y proactividad.			
Capacidad de análisis, de trabajo en equipo y carácter autocrítico.			
Criterios propios, sentido común e intuición.			

Tabla 8: Encuesta tipo diseñada con el fin de valorar el grado de influencia que han tenido las diferentes fuentes de conocimiento sobre el experto.

Como ejemplo se muestra a continuación el cálculo del coeficiente K del experto 9, que se repitió para los 19 restantes.

1. Su autoevaluación sobre su nivel de competencia es 8, por lo tanto el coeficiente de conocimiento o información es:

$$K_c = \frac{A_c}{10}$$

$$K_c = \frac{8}{10} = 0,800$$

2. La encuesta realizada sobre el grado de influencia que han tenido cada una de las fuentes de conocimiento ha sido:

Fuentes de conocimiento	Grado de influencia de las diferentes fuentes de conocimiento		
	Alto	Medio	Bajo
Experiencia general en el sector de la Seguridad y Emergencias.		X	
Experiencia profesional específica en el problema propuesto.		X	
Preparación general.		X	
Sentido de la responsabilidad y proactividad.	X		
Capacidad de análisis, de trabajo en equipo y carácter autocrítico.	X		
Criterios propios, sentido común e intuición.	X		

Tabla 9: Encuesta tipo diseñada con el fin de valorar el grado de influencia que han tenido las diferentes fuentes de conocimiento sobre el experto (encuesta correspondiente al experto número 9).

Aplicando los valores asignados a las diferentes fuentes de procedencia del conocimiento.

Fuentes de conocimiento	Grado de influencia de las diferentes fuentes de conocimiento		
	Alto	Medio	Bajo
Experiencia general en el sector de la Seguridad y Emergencias.	0,300	0,240	0,140
Experiencia profesional específica en el problema propuesto.	0,400	0,340	0,240
Preparación general.	0,200	0,150	0,080
Sentido de la responsabilidad y proactividad.	0,025	0,015	0,010
Capacidad de análisis, de trabajo en equipo y carácter autocrítico.	0,050	0,040	0,020
Criterios propios, sentido común e intuición.	0,025	0,015	0,010

Tabla 10: Encuesta realizada al experto 9 con sus correspondientes valores.

Se adapta al caso de estudio la tabla típica (ver capítulo 3), variando las fuentes de conocimiento y las puntuaciones, al considerar unas más relevantes que otras, pero siempre respetando la condición:

Fuentes de conocimiento	Grado de influencia de las diferentes fuentes de conocimiento		
	Alto	Medio	Bajo
Suma total de las diferentes puntuaciones de las fuentes de conocimiento.	1	0.8	0.5

Tabla 11: Condiciones que deben respetar las diferentes puntuaciones sobre el grado de influencia de las diferentes fuentes de conocimiento.

Se calcula el coeficiente de argumentación o fundamentación (K_a):

$$K_a = \sum_{i=1}^i C_i$$

$$K_a = 0,240 + 0,340 + 0,150 + 0,025 + 0,050 + 0,025 = 0,830$$

3. Con los valores previamente obtenidos de K_c y K_a se procede a calcular el coeficiente de competencia K :

$$K = \frac{(K_c + K_a)}{2}$$

$$K = \frac{(0,800+0,830)}{2} = 0,815$$

4. Por último y dado que $0,8 \leq K \leq 1$ entonces el coeficiente de competencia es alto. El experto queda seleccionado.

Tras el cálculo del coeficiente K se obtuvo la siguiente tabla:

E	Kc	Experiencia general en el sector de la Seguridad y Emergencias.			Experiencia profesional específica en el problema propuesto.			Preparación general.			Sentido de la responsabilidad y proactividad.			Capacidad de análisis, de trabajo en equipo y carácter autocrítico.			Criterios propios, sentido común e intuición.			Ka	K
		Alto	Medio	Bajo	Alto	Medio	Bajo	Alto	Medio	Bajo	Alto	Medio	Bajo	Alto	Medio	Bajo	Alto	Medio	Bajo		
		0,300	0,240	0,140	0,400	0,340	0,240	0,200	0,150	0,080	0,025	0,015	0,010	0,050	0,040	0,020	0,025	0,015	0,010		
1	0,900	0,300			0,400			0,200			0,025			0,050			0,025			1,000	0,950
2	0,700		0,240			0,340			0,150			0,015		0,050				0,015		0,810	0,755
3	0,600	0,300			0,400				0,150		0,025				0,040			0,015		0,930	0,765
4	0,400			0,140			0,240			0,080		0,015		0,050					0,010	0,535	0,468
5	0,700		0,240			0,340			0,150			0,015		0,050			0,025			0,820	0,760
6	0,500		0,240				0,240		0,150		0,025				0,040			0,015		0,710	0,605
7	0,600		0,240			0,340			0,150			0,015			0,040			0,015		0,800	0,700
8	0,700	0,300					0,240	0,200				0,015			0,040			0,015		0,810	0,755
9	0,800		0,240			0,340			0,150		0,025			0,050			0,025			0,830	0,815
10	0,300			0,140			0,240			0,080	0,025				0,040			0,015		0,540	0,420
11	0,700	0,300				0,340			0,150				0,010			0,020			0,010	0,830	0,765
12	0,500			0,140		0,340		0,200			0,025			0,050			0,025			0,780	0,640
13	0,700	0,300				0,340			0,150			0,015			0,040			0,015		0,860	0,780
14	0,600			0,140			0,240		0,150		0,025			0,050			0,025			0,630	0,615
15	0,900	0,300			0,400			0,200				0,015		0,050			0,025			0,990	0,945
16	0,300			0,140			0,240			0,080		0,015				0,020		0,015		0,510	0,405
17	0,700	0,300				0,340			0,150				0,010		0,040			0,015		0,855	0,778
18	0,900	0,300			0,400			0,200			0,025			0,050				0,015		0,990	0,945
19	0,400			0,140			0,240			0,080			0,010	0,050			0,025			0,545	0,473
20	0,600		0,240			0,340			0,150				0,010		0,040			0,015		0,795	0,698

Tabla 12: Valores obtenidos de K_c, K_a y K por los diferentes expertos.

Recordar que el coeficiente de competencia se evalúa a partir de:

- Si $0,8 \leq K \leq 1$ entonces el coeficiente de competencia es alto.
- Si $0,5 \leq K \leq 0,8$ entonces el coeficiente de competencia es medio.
- Si $K \leq 0,5$ entonces el coeficiente de competencia es bajo.

Analizando los datos se observa lo siguiente:

1. Cuatro expertos tienen un coeficiente de competencia alto (resaltados en rojo), que serán los que conformarán el grupo de expertos para la extracción del conocimiento mediante la metodología AHP.
2. Cuatro expertos tienen un coeficiente de competencia bajo (resaltados en azul e introducidos para verificar las posibles desviaciones del método).
3. Doce expertos tienen un coeficiente de competencia medio.

5.1.2.2. Modelar y/o descomponer el problema de decisión a resolver como una jerarquía cuyos elementos estén interrelacionados.

Para poder aplicar este método es necesario que criterios, subcriterios y alternativas se puedan estructurar jerárquicamente. El primer nivel jerárquico corresponde a la meta, objeto o propósito general del problema, el segundo a los criterios y subcriterios, si los hubiera, y el tercero a las alternativas o soluciones.

Para el caso planteado la secuencia seguida ha sido:

- En primer lugar la identificación del problema y definición del objetivo (ya visto en capítulos anteriores).
- Construcción del modelo jerárquico, identificando criterios, subcriterios y alternativas posibles. Se muestra a continuación.

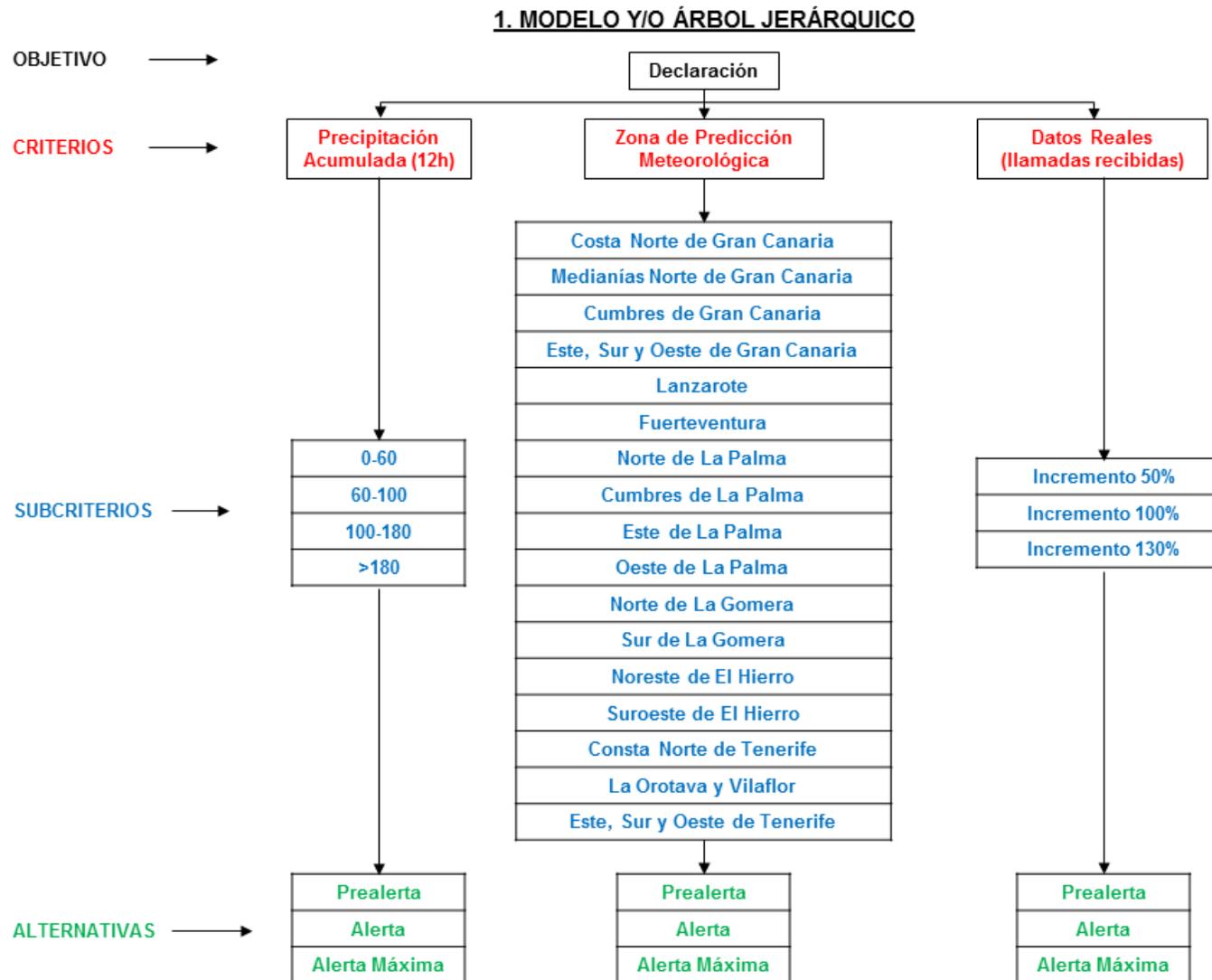


Figura 7: Estructura jerárquica AHP (elaboración propia).

5.1.2.3. Desarrollar la “Matriz de Comparación por Pares” de alternativas para cada uno de los criterios y/o subcriterios.

Una comparación puede entenderse y expresarse como la representación numérica de una relación entre dos elementos que comparten algo en común.

Un conjunto de comparaciones puede representarse mediante una matriz en la que cada comparación representará la dominancia de un elemento (criterios, subcriterios, alternativas, etc.) sobre el otro (para este caso el elemento de la columna de la izquierda de la matriz sobre un elemento de la fila superior de la misma matriz).

MATRIZ	Elemento 1 (fila superior)	Elemento 2 (fila superior)
Elemento 1(columna izquierda)		
Elemento 2(columna izquierda)		

Tabla 13: Matriz de comparaciones pareadas.

Si el elemento de la izquierda es menos importante que el elemento de la parte superior de la matriz se introduce el valor recíproco ($1/a_{ij}$) en la posición correspondiente de la matriz. En general y para una matriz (4x4) de comparación de criterios por pares se cumple:

	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4
Criterio 1	$a_{11}=1$	a_{12} = se compara la preferencia del 1 con el 2	a_{13} = se compara la preferencia del 1 con el 3	a_{14} = se compara la preferencia del 1 con el 4
Criterio 2	a_{21} = inverso de a_{12}	$a_{22}=1$	a_{23} = se compara la preferencia del 2 con el 3	a_{24} = se compara la preferencia del 1 con el 4
Criterio 3	a_{31} = inverso de a_{13}	a_{32} = inverso de a_{23}	$a_{33}=1$	a_{34} = se compara la preferencia del 3 con el 4
Criterio 4	a_{41} = inverso de a_{14}	a_{42} = inverso de a_{24}	a_{43} = inverso de a_{34}	$a_{44}=1$

Tabla 14: Matriz de comparaciones pareadas. Elementos inversos.

AHP permite criterios y/o subcriterios cualitativos y cuantitativos y plasma la importancia relativa de un criterio y/o subcriterio sobre otro usando la comparación por pares.

Para las comparaciones se usa la escala de comparación de Saaty [3], vista anteriormente (tabla 4).

Pueden usarse los valores intermedios 2, 4, 6, 8 para interpolar un juicio de acomodo numérico porque no existe una palabra que sirva para describirlo. Un valor recíproco ($1/9$, $1/7$, $1/5$, $1/3$,...) se utiliza cuando la segunda alternativa es preferida a la primera. El valor 1 es usado a la comparación de una alternativa con sí misma.

Para extraer el conocimiento de los diferentes expertos se realizaron las encuestas, con el diseño que a continuación se presenta y en base a ellas se construyeron las matrices correspondientes de comparación por pares.

El proceso se repitió para los diferentes criterios y subcriterios. A continuación se muestra el resultado obtenido de la encuesta al experto 1.

CRITERIO	Extremadamente preferida (9)	Muy fuertemente preferida (7)	Fuertemente preferida (5)	Moderadamente preferida (3)	Igualmente preferida (1)	Moderadamente preferida (3)	Fuertemente preferida (5)	Muy fuertemente preferida (7)	Extremadamente preferida (9)	CRITERIO
Precipitación acumulada				X						Zona de predicción
Precipitación acumulada							X			Datos reales (llamadas)
Zona de predicción									X	Datos reales (llamadas)

Tabla 15: Tabla encuesta para criterios del experto 1.

Usando la comparación por pares puede expresarse la importancia relativa de un criterio sobre otro obteniendo la matriz siguiente:

	Precipitación acumulada	Zona de predicción	Datos reales (llamadas)
Precipitación acumulada	1/1	3/1	1/5
Zona de predicción	1/3	1/1	1/9
Datos reales (llamadas)	5/1	9/1	1/1

Tabla 16: Matriz de comparación por pares entre criterios para el experto 1.

Sobre la matriz anterior se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Para el experto, la precipitación acumulada es moderadamente más importante que la zona de predicción meteorológica. Por lo tanto, es un criterio al que el experto le da un mayor valor sobre la zona de predicción.
- Sin embargo, cuando se trata de compararla con datos reales, como son las llamadas recibidas en el 1-1-2 una vez empieza el FMA, para el experto es fuertemente más importante los datos reales que la precipitación acumulada.
- Cuando un criterio se compara consigo mismo la valoración es 1, ya que son igualmente preferidos.

Ahora que se tiene la matriz de comparación por pares entre criterios surgen las siguientes cuestiones:

- ¿Cómo convertir esta matriz en una clasificación de criterios?
- ¿Cómo conseguir el orden de prioridades de una matriz de pares?

Dando respuesta a estas preguntas Tomas Saaty [3] demostró matemáticamente que el autovector es la mejor aproximación. Por lo tanto, el siguiente paso será calcular el autovector y/o vector propio que dará el orden de prioridad a los criterios.

Antes de calcular el autovector se debe valorar la consistencia de la matriz. Esta es una de las características más importantes de la metodología ya que permite valorar si la información que se está introduciendo para la toma de decisiones es correcta o no, es decir, que no se está metiendo información incoherente e inconsistente.

5.1.2.4. Cálculo de la consistencia de la “Matriz de Comparación por Pares”.

Una de las consideraciones a tener en cuenta con respecto a la calidad de la decisión final está relacionada directamente con la consistencia de los juicios emitidos por los expertos. Debe asumirse que es difícil conseguir la consistencia ideal o perfecta y que puede esperarse una leve inconsistencia en cualquier juego de comparaciones por pares. Si el grado de inconsistencia es aceptable el proceso ha de continuar, de lo contrario se deben replantear los juicios o rechazarlos si es elevada.

Para ello se mide el ratio de consistencia (CR) de las matrices de tal forma que una matriz es buena si cumple:

Tamaño de la matriz y/o rango	% máximo para el ratio de consistencia
3	5%
4	9%
>=5	10%

Tabla 17: Máximo ratio de consistencia en función del rango de la matriz.

Si se superan los % máximo para el ratio de consistencia las opiniones o juicios deberán ser reconsiderados.

Ante las inconsistencias de las matrices se observan dos planteamientos posibles:

- Si es muy inconsistente es mejor no utilizarla.
- Si es ligeramente inconsistente se puede intentar mejorar la consistencia revisando la matriz a partir de las ponderaciones obtenidas, como indica el profesor Saaty [3].

A continuación se calcula la consistencia de la matriz de comparación por pares anterior, que corresponde a las opiniones de uno de los expertos encuestados, del total de cuatro. El cálculo se repetiría para todas las matrices de comparación pareada, por criterios, subcriterios y experto (11 matrices x 4 expertos = 44 matrices).

Las 11 matrices por experto corresponden a:

- 1 para los criterios (precipitación, zona y datos reales)
- 10 matrices para los subcriterios (1 para precipitación, 2 para la provincia y 7 para las islas).

Sea $X = \{1, 2, 3, 4, \dots, m\}$ el número de expertos y $n = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ el número de criterios se tiene:

$$\text{Experto X} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{Experto 1} = \begin{bmatrix} 1/1 & 3/1 & 1/5 \\ 1/3 & 1/1 & 1/9 \\ 5/1 & 9/1 & 1/1 \end{bmatrix}$$

Tabla 18: Matriz de comparación por pares para criterios del experto 1.

Para analizar la consistencia de la matriz, en primer lugar se normaliza la matriz de comparaciones pareadas por columnas usando la suma y se calcula la matriz promedio.

$$\text{Experto X} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}/\sum_1^n a_{j1} & a_{12}/\sum_1^n a_{j2} & \dots & a_{1n}/\sum_1^n a_{1j} \\ a_{21}/\sum_1^n a_{j1} & a_{22}/\sum_1^n a_{j2} & \dots & a_{2n}/\sum_1^n a_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1}/\sum_1^n a_{j1} & a_{n2}/\sum_1^n a_{j2} & \dots & a_{nn}/\sum_1^n a_{ij} \end{bmatrix}$$

Al normalizar ha de cumplirse:

$$\begin{aligned} a_{11}/\sum_1^n a_{j1} + a_{21}/\sum_1^n a_{j1} + \dots + a_{n1}/\sum_1^n a_{j1} &= a_{12}/\sum_1^n a_{j2} + a_{22}/\sum_1^n a_{j2} + \dots + a_{n2}/\sum_1^n a_{j2} = \\ \dots &= a_{1n}/\sum_1^n a_{1j} + a_{2n}/\sum_1^n a_{2j} + \dots + a_{nn}/\sum_1^n a_{ij} = 1 \end{aligned}$$

Una vez normalizada la matriz se calcula la matriz promedio, sumando las filas y dividiendo el total de la suma por el número de criterios.

$$\text{Matriz promedio experto X} = \begin{bmatrix} (a_{11}/\sum_1^n a_{j1} + a_{12}/\sum_1^n a_{j2} + \dots + a_{1n}/\sum_1^n a_{1j}) /n \\ (a_{21}/\sum_1^n a_{j1} + a_{22}/\sum_1^n a_{j2} + \dots + a_{2n}/\sum_1^n a_{2j})/n \\ \dots \\ \dots \\ (a_{n1}/\sum_1^n a_{j1} + a_{n2}/\sum_1^n a_{j2} + \dots + a_{nn}/\sum_1^n a_{ij})/n \end{bmatrix}$$

$$\text{Matriz normalizada experto 1} = \begin{bmatrix} 0,1579 & 0,2308 & 0,1525 \\ 0,0526 & 0,0769 & 0,0847 \\ 0,7895 & 0,6923 & 0,7627 \end{bmatrix}$$

$$\text{Matriz promedio experto 1} = \begin{bmatrix} 0,5412/3 \\ 0,2143/3 \\ 2,2445/3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,1804 \\ 0,0714 \\ 0,7482 \end{bmatrix}$$

	Precipitación acumulada	Zona de predicción	Datos reales (llamadas)	Suma de filas	Promedio (div por 3)
Precipitación acumulada	0,1579	0,2308	0,1525	0,5412	0,1804
Zona de predicción	0,0526	0,0769	0,0847	0,2143	0,0714
Datos reales (llamadas)	0,7895	0,6923	0,7627	2,2445	0,7482
SUMA	1,0000	1,0000	1,0000		

Tabla 19: Tabla resumen normalización matriz pareada y matriz promedio experto 1.

Ahora se multiplica la matriz original (del experto 1) por la matriz promedio. Al resultado se la llama matriz vector fila total.

Matriz vector fila total experto X =

$$\begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} & (a_{11}/\sum_1^n a_{j1} + a_{12}/\sum_1^n a_{j2} + \dots + a_{1n}/\sum_1^n a_{jn}) /n \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} & (a_{21}/\sum_1^n a_{j1} + a_{22}/\sum_1^n a_{j2} + \dots + a_{2n}/\sum_1^n a_{jn})/n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 & (a_{n1}/\sum_1^n a_{j1} + a_{n2}/\sum_1^n a_{j2} + \dots + a_{nn}/\sum_1^n a_{jn})/n \end{bmatrix} X$$

$$\text{Matriz vector fila total experto 1} = \begin{bmatrix} 1/1 & 3/1 & 1/5 \\ 1/3 & 1/1 & 1/9 \\ 5/1 & 9/1 & 1/1 \end{bmatrix} X \begin{bmatrix} 0,1804 \\ 0,0714 \\ 0,7482 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,5443 \\ 0,2147 \\ 2,2931 \end{bmatrix}$$

La matriz vector fila total y el promedio se dividen término por término y se obtiene el cociente.

Siendo la matriz vector fila total para el experto $X = \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ \dots \\ a_{n1} \end{bmatrix}$ y la matriz promedio = $\begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ \dots \\ b_{n1} \end{bmatrix}$

Se define el cociente para el experto $X = \begin{bmatrix} a_{11}/b_{11} \\ a_{21}/b_{21} \\ \dots \\ a_{n1}/b_{n1} \end{bmatrix}$

$$\lambda_{\max}(\text{media}) \text{ para el experto } X = \sum_1^n (a_{n1}/b_{n1}) / n$$

λ_{\max} permite medir el índice de consistencia (CI) para posteriormente calcular el ratio de consistencia (CR).

El índice de consistencia para el experto X viene definido por:

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n-1), \text{ siendo } n \text{ el tamaño de la matriz.}$$

Siendo la matriz vector fila total para el experto 1 = $\begin{bmatrix} 0,5443 \\ 0,2147 \\ 2,2931 \end{bmatrix}$ y la promedio = $\begin{bmatrix} 0,1804 \\ 0,0714 \\ 0,7482 \end{bmatrix}$

El cociente para el experto 1 = $\begin{bmatrix} 0,5443 / 0,1804 \\ 0,2147 / 0,0714 \\ 2,2931 / 0,7482 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,0173 \\ 3,0056 \\ 3,0649 \end{bmatrix}$

$$\lambda_{\max}(\text{media}) \text{ para el experto 1} = (3,0173+3,0056+3,0649)/3 = 3,0293$$

El índice de consistencia de la matriz de comparaciones pareadas de los criterios

considerados y para el experto 1 es: $CI = (3,0293-3) / (3-1) = 0,0146$

El ratio de consistencia (CR) es igual al índice de consistencia (CI) dividido por la consistencia aleatoria de la matriz. Por otro lado, la consistencia aleatoria (consistencia media de 100.000 matrices construidas aleatoriamente) es un parámetro que viene dado y que permite pasar del índice de consistencia al ratio de consistencia y va a depender del rango de la matriz.

Tamaño de la matriz	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Consistencia aleatoria	0,00	0,00	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49

Tabla 20: Índice de consistencia aleatorio en función del rango de la matriz de Saaty [3][4]

Según Saaty [3] [4], para tamaños de matriz mayor de 15 los márgenes de error acumulado son significativos.

$$CR = CI / 0,52 = 0,0282, \text{ que representa el } 2,82\%.$$

Recordar que para una matriz de rango 3 el % máximo para el ratio de consistencia es del 5% (tabla 17), por lo tanto se puede concluir que la matriz es consistente y los juicios emitidos por el experto 1 también lo son.

5.1.2.5. Cálculo del Autovector

Tomas Saaty [3] [4] demostró matemáticamente que el autovector es la mejor aproximación para conseguir el orden de prioridades de una matriz de pares. Por lo tanto, el siguiente paso será calcular el autovector o vector propio, que dará el orden de prioridad de los criterios.

El primer paso para calcular el autovector es elevar la matriz al cuadrado, es decir, se multiplica por ella misma y se obtiene una tercera matriz.

Si la matriz de comparaciones pareadas para el experto X =

$$\begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Se multiplica por ella misma y se obtiene la matriz $B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{nn} \end{bmatrix}$

Se suman las filas de la matriz B y se obtiene $\begin{bmatrix} \sum_1^n b_{1j} \\ \sum_1^n b_{2j} \\ \dots \\ \dots \\ \sum_1^n b_{nj} \end{bmatrix}$

Se normaliza por la suma $\sum_1^n (b_{1j} + b_{2j} + \dots + b_{nj})$ y se obtiene el autovector:

$$P = \begin{bmatrix} \sum_1^n b_{1j} / \sum_1^n (b_{1j} + b_{2j} + \dots + b_{nj}) \\ \sum_1^n b_{2j} / \sum_1^n (b_{1j} + b_{2j} + \dots + b_{nj}) \\ \dots \\ \dots \\ \sum_1^n b_{nj} / \sum_1^n (b_{1j} + b_{2j} + \dots + b_{nj}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} \\ P_{21} \\ \dots \\ \dots \\ P_{n1} \end{bmatrix}$$

El proceso se repite hasta que el autovector no cambie de la iteración anterior, es decir, se eleva nuevamente la matriz B al cuadrado y se repiten los pasos anteriores.

El autovector generado se compara con el autovector anterior para observar si hay diferencia significativa:

- Si se observa que no las hay no se repite más el proceso y se acepta el autovector generado como el válido para obtener el orden de prioridad de los criterios.
- Si la diferencia fuera representativa se tendría que repetir el proceso hasta conseguir el autovector definitivo.

	Se suma cada fila		Se normaliza dividiendo cada suma por el total. El resultado es el autovector
$\begin{bmatrix} 1,0000 & 3,0000 & 0,2000 \\ 0,3333 & 1,0000 & 0,1111 \\ 5,0000 & 9,0000 & 1,0000 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1,0000 & 3,0000 & 0,2000 \\ 0,3333 & 1,0000 & 0,1111 \\ 5,0000 & 9,0000 & 1,0000 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,0000 & 7,8000 & 0,7333 \\ 1,2222 & 3,0000 & 0,2889 \\ 13,0000 & 33,0000 & 3,0000 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 11,5333 \\ 4,5111 \\ 49,0000 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,1773 \\ 0,0694 \\ 0,7533 \end{bmatrix}$			
Suma el total de las filas	65,0444		1,0000

El proceso se repite hasta que el autovector no cambie de la iteración anterior, es decir, se eleva nuevamente la matriz al cuadrado y se repiten los pasos anteriores.

$\begin{bmatrix} 3,0000 & 7,8000 & 0,7333 \\ 1,2222 & 3,0000 & 0,2889 \\ 13,0000 & 33,0000 & 3,0000 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 3,0000 & 7,8000 & 0,7333 \\ 1,2222 & 3,0000 & 0,2889 \\ 13,0000 & 33,0000 & 3,0000 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 28,0667 & 71,0000 & 6,6533 \\ 11,0889 & 28,0667 & 2,6296 \\ 118,3333 & 299,4000 & 28,0667 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 105,7200 \\ 41,7852 \\ 445,8000 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,1782 \\ 0,0704 \\ 0,7514 \end{bmatrix}$			
Suma el total de las filas	593,3052		1,0000

El autovector generado se compara con el autovector anterior para observar si hay diferencia significativa y se observa que no las hay. Si la diferencia fuera representativa se tendría que repetir el proceso hasta conseguir el autovector definitivo. El autovector da el orden de prioridad a los criterios.

$$\begin{array}{r}
 0,1773 \quad 0,1782 \quad -0,0009 \\
 0,0694 - 0,0704 = -0,0011 \\
 0,7533 \quad 0,7514 \quad 0,0019
 \end{array}$$

Finalmente se obtiene:

	Precipitación acumulada	Zona de predicción	Datos reales (llamadas)	Vector propio
Precipitación acumulada	1/1	3/1	1/5	0,1773
Zona de predicción	1/3	1/1	1/9	0,0694
Datos reales (llamadas)	5/1	9/1	1/1	0,7533
CR	2,82%	< 5%		1,0000

Tabla 21: Tabla resumen matriz de comparaciones pareadas de criterios, vectores propios y ratio de consistencia obtenida para los juicios de valor del experto 1.

De la anterior se puede concluir:

- Los juicios emitidos por el experto 1 son consistentes.
- Una vez ponderados los criterios se puede observar que no todos influyen, para el experto 1, de la misma forma o en el mismo porcentaje en el interés de las alternativas.
- Para el experto 1 el peso de los datos reales es un 75,33%, frente al 17,73% de la precipitación acumulada y del 6,94% de la zona de predicción. Por lo tanto, los datos reales son los que mayor influencia tienen sobre las alternativas, seguidos por la precipitación acumulada y la zona. Estos dos últimos corresponden a la predicción meteorológica.

- Como cada experto puede tener una opinión diferente, y son cuatro, para hacer la agregación de sus juicios se realiza la media geométrica de los vectores propios que se han generado con la opinión de cada uno.

Si se tienen x expertos y x autovectores generados, definidos por $P^x = \begin{bmatrix} P_{11}^x \\ P_{21}^x \\ \dots \\ P_{n1}^x \end{bmatrix}$

Se agregan los diferentes juicios mediante la media geométrica de los diferentes vectores propios y se obtiene:

$$\text{Vector propio que representa a todos los expertos} = \begin{bmatrix} \sqrt[x]{\prod_{i=1}^x P_{11}^i} = \sqrt[x]{P_{11}^1 P_{11}^2 \dots P_{11}^x} \\ \sqrt[x]{\prod_{i=1}^x P_{21}^i} = \sqrt[x]{P_{21}^1 P_{21}^2 \dots P_{21}^x} \\ \dots \\ \dots \\ \sqrt[x]{\prod_{i=1}^x P_{n1}^i} = \sqrt[x]{P_{n1}^1 P_{n1}^2 \dots P_{n1}^x} \end{bmatrix}$$

La agregación de una serie de vectores propios normalizados no da como resultado un vector propio normalizado, por lo tanto, hay que normalizar la agregación por la suma (ver 5.1.2.5).

- Para que a través de la comparación por pares se obtengan los resultados esperados es imprescindible que en el proceso de comparación el decisor haya sido muy escrupuloso con las valoraciones, ya que un posible error de incoherencia da como resultado una matriz de la que se obtiene un autovalor poco representativo.

Lo explicado suele ocurrir cuando se generan contradicciones al incumplir la transitividad de los valores y/o juicios emitidos por los expertos. Por ejemplo, si se han realizado una serie de valoraciones en las que $A1 > A2$ y $A2 > A3$ y al realizar la comparación por separado $A3 > A1$, entonces se está ante una clara incoherencia.

Todo lo anterior obliga a la búsqueda de posibles inconsistencias en la matriz de comparación pareada y a medir y valorar la consistencia de los juicios emitidos por los expertos. Esto es, obliga a que el proceso que se emplea antes del cálculo del

autovector sea el de valoración de la consistencia de la matriz de comparación por pares.

Las ventajas de AHP frente a otros métodos de decisión multicriterio son las siguientes:

- Presenta un sustento matemático.
- Permite extraer los conocimientos de los expertos, dar consistencia a sus juicios de valor y si fuera necesario realizar correcciones.
- Permite desglosar y analizar un problema por partes.
- Permite medir criterios cuantitativos y cualitativos.

5.1.2.6. Agregación de opiniones y/o juicios de valor del resto de expertos.

Ya se han realizado todos los cálculos correspondientes a la matriz de comparación por pares de alternativas para cada uno de los criterios con respecto al experto 1. A continuación se puede observar lo que sucede con respecto a los expertos 2, 3 y 4 y como se agregan sus opiniones o juicios de valor.

5.1.2.6.1. Datos obtenidos de los diferentes expertos.

Con relación al experto 2 se tiene:

	Precipitación acumulada	Zona de predicción	Datos reales (llamadas)	Vector propio
Precipitación acumulada	1	3	1/3	0,2573
Zona de predicción	1/3	1	1/5	0,1030
Datos reales (llamadas)	3	5	1	0,6397
CR	3,7226%	< 5%		1,0000

Tabla 22: Matriz de comparaciones pareadas de criterios, vectores propios y ratio de consistencia obtenidos para los juicios de valor del experto 2.

Con relación al experto 3 se tiene:

	Precipitación acumulada	Zona de predicción	Datos reales (llamadas)	Vector propio
Precipitación acumulada	1	5	1/9	0,1404
Zona de predicción	1/5	1	1/9	0,0441
Datos reales (llamadas)	9	9	1	0,8154
CR	30,5853%	< 5%		1,0000

Tabla 23: Matriz de comparaciones pareadas de criterios, vectores propios y ratio de consistencia obtenidos para los juicios de valor del experto 3.

La inconsistencia es tan elevada que para estos casos es mejor desechar los juicios de valor de este experto.

La inconsistencia fue generada por el experto con menor K de los cuatro seleccionados.

Con relación al experto 4 se tiene:

	Precipitación acumulada	Zona de predicción	Datos reales (llamadas)	Vector propio
Precipitación acumulada	1	1	1/9	0,0909
Zona de predicción	1	1	1/9	0,0909
Datos reales (llamadas)	9	9	1	0,8182
CR	0,0000%	< 5%		1,0000

Tabla 24: Matriz de comparaciones pareadas de criterios, vectores propios y ratio de consistencia obtenidos para los juicios de valor del experto 4.

5.1.2.6.2. Agregación de las opiniones de los expertos seleccionados.

Para agregar las diferentes opiniones de los tres expertos, con juicios de valor consistentes, el procedimiento que se sigue es el de obtener un vector propio que integre la opinión de todos. Para ello, se escogen los vectores propios de los expertos 1, 2 y 4, desechando los juicios del experto 3 por ser altamente inconsistentes.

Una vez se dispone de los vectores propios de los tres expertos (X=3), se realiza la media geométrica y se normaliza por la suma.

$$\text{Vector propio que agrega la opinión de los expertos seleccionados} = \begin{bmatrix} \sqrt[x]{P_{11}^1 P_{11}^2 \dots P_{11}^x} \\ \sqrt[x]{P_{21}^1 P_{21}^2 \dots P_{21}^x} \\ \dots \\ \sqrt[x]{P_{n1}^1 P_{n1}^2 \dots P_{n1}^x} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \sqrt[3]{P_{11}^1 P_{11}^2 P_{11}^3} \\ \sqrt[3]{P_{21}^1 P_{21}^2 P_{21}^3} \\ \sqrt[3]{P_{31}^1 P_{31}^2 P_{31}^3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,1607 \\ 0,0866 \\ 0,7333 \end{bmatrix}$$

La agregación de una serie de vectores propios normalizados no da como resultado un vector propio normalizado, por lo tanto, hay que normalizar la agregación por la suma (ver 5.1.2.5).

Vector propio experto 1	Vector propio experto 2	Vector propio experto 4	Media geométrica	Normalización por la suma
0,1773	0,2573	0,0909	0,1607	0,1639
0,0694	0,1030	0,0909	0,0866	0,0883
0,7533	0,6397	0,8182	0,7333	0,7478
		SUMA	0,9806	1

Tabla 25: Tabla resumen de la media geométrica normalizada de los vectores propios de los diferentes expertos.

Finalmente se tiene el vector propio normalizado correspondiente a la opinión de los tres expertos con juicios de valor consistentes.

	Vector propio final
Precipitación acumulada	0,1639
Zona de predicción	0,0883
Datos reales (llamadas)	0,7478

Tabla 26: Vector propio que integra la opinión de los diferentes expertos.

5.1.2.7. “Matriz de Comparación por Pares” de alternativas para subcriterio precipitación acumulada.

Se repite todo el proceso utilizado para los criterios y se obtiene como vector propio final:

	Vector propio final
0-60	0,0531
60-100	0,1148
100-180	0,2651
>180	0,5670

Tabla 27: Vector propio para el subcriterio precipitación acumulada.

Se debe tener en cuenta que no existían diferencias significativas entre las opiniones de cada experto por separado, por lo tanto, los vectores propios generados en cada experto coincidían con el vector propio final obtenido tras agregar las opiniones.

5.1.2.8. “Matriz de Comparación por Pares” de alternativas para subcriterio incremento de llamadas.

Se repite todo el proceso utilizado para los criterios y se obtiene como vector propio final:

	Vector propio final
Incremento 0-50%	0,0618
Incremento 50-100%	0,2648
Incremento >100%	0,6734

Tabla 28: Vector propio para el subcriterio incremento de llamadas.

Igual que en el punto subcriterio anterior, no existían diferencias significativas entre las opiniones de cada experto por separado.

5.1.2.9. “Matriz de Comparación por Pares” de alternativas para subcriterio zona.

Dado que la matriz que se generaba era excesivamente grande (tamaño 17) y por lo tanto los problemas de consistencia eran importantes y de difícil solución, se decidió dividir este subcriterio en diferentes subcriterios, algo que el método permite y favorece (los diferentes niveles de jerarquización).

De idéntica manera que para los subcriterios anteriores no se detectaron diferencias significativas entre las opiniones de cada experto por separado, por lo tanto, los vectores propios generados en cada experto coincidían con el vector propio final obtenido tras agregar las opiniones.

Se repite todo el proceso que se utilizó para los criterios.

5.1.2.9.1. Subcriterio provincias.

	Vector propio final
Las Palmas	0,6667
S/C de Tenerife	0,3333

Tabla 29: Vector propio para el subcriterio zona.

Se puede observar que para el grupo de expertos la provincia de Las Palmas tenía mayor peso, concretamente un 66,67%, que la provincia de Santa Cruz de Tenerife, que tenía un 33.33%. Estos pesos mostraban la importancia de que el experto daba de cara a las alternativas posibles, es decir, la declaración de una prealerta, alerta o alerta máxima.

Esto indica que ante idénticas condiciones meteorológicas los expertos mostraban una mayor preocupación por la provincia más cercana al continente africano que por la otra, a la hora de elegir las alternativas posibles. Por este motivo y el anteriormente expuesto, se realizó un nivel de jerarquización mayor, con la idea de seguir profundizando en el conocimiento de los diferentes expertos y ver que podían aportar en la posible mejora del sistema final.

Recordar que para METEOALERTA [2] y PEFMA [1] las dos provincia tenían la misma consideración.

5.1.2.9.2. Subcriterio islas.

	Vector propio final
Gran Canaria	0,6000
Lanzarote	0,2000
Fuerteventura	0,2000
La Palma	0,0917
Gomera	0,2064
El Hierro	0,2064
Tenerife	0,4954

Tabla 30: Vector propio para las islas de cada provincia.

5.1.2.9.3. Subcriterio zona.

Se tendrá en cuenta cada isla, salvo Lanzarote y Fuerteventura cuya zona de predicción meteorológica abarca toda la isla.

Como ya se ha expuesto, no se detectaron diferencias significativas entre las opiniones de cada experto por separado. Sin embargo, se observó que todos los expertos coincidían en determinados aspectos, como considerar de igual importancia determinadas zonas (ver Costa Norte de Tenerife y La Orotava y Vilaflor).

	Consta Norte de Tenerife	La Orotava y Vilaflor	Este, Sur y Oeste de Tenerife	Vector Propio
Consta Norte de Tenerife	1	1	1/3	0,2000
La Orotava y Vilaflor	1	1	1/3	0,2000
Este, Sur y Oeste de Tenerife	3	3	1	0,6000
CR	0,0000%	< 5%		1,0000

Tabla 31: Matriz de comparaciones pareadas, vectores propios y ratio de consistencia obtenidos para los juicios de valor de los diferentes expertos para la isla de Tenerife.

Observando la matriz de comparación por pares y dado que la opinión de los diferentes expertos era la misma, surgía la necesidad de unificar determinadas zonas de predicción

meteorológica que por separado no aportaban nada y sin embargo unificándolas simplificaban enormemente la gestión.

Generalizando:

- Si se tiene un matriz cuadrada nxn de comparación pareada que genera un

$$\text{autovector } P = \begin{bmatrix} P_{11} \\ P_{21} \\ \dots \\ \dots \\ P_{n1} \end{bmatrix}.$$

- Si P_{i1} corresponde al peso o importancia del subcriterio asociado a la fila i , de la matriz de comparación por pares, siendo $i = \{1,2,\dots,n\}$.
- Si P_{j1} corresponde al peso o importancia del subcriterio asociado a la fila j , de la matriz de comparación por pares, siendo $j = \{1,2,\dots,n\}$

Se puede afirmar que $\forall i \neq j \wedge P_{ii} = P_{jj}$:

- Los subcriterios asociados tienen el mismo peso con respecto a las alternativas.
- Aportan la misma información al sistema.
- Se pueden unificar.

Para este caso se propone unificar las zonas Costa Norte de Tenerife y La Orotava y Vilaflor en una que sería Norte de Tenerife.

	Norte de La Palma	Cumbres de La Palma	Este de La Palma	Oeste de La Palma	Vector Propio
Norte de La Palma	1	1	3	3	0,3716
Cumbres de La Palma	1	1	3	3	0,3716
Este de La Palma	1/3	1/3	1	1/3	0,0917
Oeste de La Palma	1/3	1/3	3	1	0,1651
CR	5,9233%	< 9%			1,0000

Tabla 32: Matriz de comparaciones pareadas, vectores propios y ratio de consistencia obtenidos para los juicios de valor de los diferentes expertos para la isla de La Palma.

Para La Palma también se detecta que se deberían unificar las zonas que los expertos consideran de igual importancia y poco relevante que estén separadas.

	Norte de La Gomera	Sur de La Gomera	Vector Propio
Norte de La Gomera	1	1	0,5000
Sur de La Gomera	1	1	0,5000
CR	0	0%	1,0000

Tabla 33: Matriz de comparaciones pareadas, vectores propios y ratio de consistencia obtenidos para los juicios de valor de los diferentes expertos para la isla de La Gomera.

También para La Gomera se detecta que se deberían unificar las zonas que los expertos consideran de igual importancia.

	Noreste de El Hierro	Suroeste de El Hierro	Vector Propio
Noreste de El Hierro	1	1	0,5000
Suroeste de El Hierro	1	1	0,5000
CR	0	0%	1,0000

Tabla 34: Matriz de comparaciones pareadas, vectores propios y ratio de consistencia obtenidos para los juicios de valor de los diferentes expertos para la isla de El Hierro.

Igualmente en El Hierro se deberían unificar las zonas de igual importancia.

	Costa Norte de Gran Canaria	Medianías Norte de Gran Canaria	Cumbres de Gran Canaria	Este, Sur y Oeste de Gran Canaria	Vector Propio
Costa Norte de Gran Canaria	1	1	3	3	0,3716
Medianías Norte de Gran Canaria	1	1	3	3	0,3716
Cumbres de Gran Canaria	1/3	1/3	1	1/3	0,0917
Este, Sur y Oeste de Gran Canaria	1/3	1/3	3	1	0,1651
CR	5,9233%	< 9%			1,0000

Tabla 35: Matriz de comparaciones pareadas, vectores propios y ratio de consistencia obtenidos para los juicios de valor de los diferentes expertos para la isla de Gran Canaria.

Por último, para Gran Canaria sucede lo mismo, se deberían unificar las zonas que los expertos consideran de igual importancia.

Con respecto a Lanzarote y Fuerteventura el valor es 1, ya que en esas islas la zona de predicción meteorológica es toda la isla.

Una vez se ha obtenido todo el conocimiento de los expertos sobre los diferentes criterios y subcriterios se procede a sintetizar los juicios para producir un conjunto de prioridades locales y globales de las jerarquías. Todo esto permitirá sacar las primeras conclusiones y posteriormente aplicar la Lógica Difusa.

5.1.2.10. Prioridades locales y globales del árbol jerárquico.

En esta etapa se obtienen las prioridades locales y globales. En las diferentes prioridades se integran las preferencias que el experto tiene al comparar aspectos tangibles e intangibles. En un problema jerarquizado como el que se presenta se pueden definir distintos tipos de prioridades.

	1ª JERARQUÍA (VARIABLES PRIMARIAS) (prioridades locales)		2ª JERARQUÍA (prioridades locales)	Prioridades globales		3ª JERARQUÍA (prioridades locales)	Prioridades globales		4ª JERARQUÍA (prioridades locales)	Prioridades globales
ZONA	0,0883	Las Palmas	0,6667	0,0589	Gran Canaria	0,6000	0,0353	Costa Norte de Gran Canaria	0,3716	0,0131
								Medianías Norte de Gran Canaria	0,3716	0,0131
								Cumbres de Gran Canaria	0,0917	0,0032
								Este, Sur y Oeste de Gran Canaria	0,1651	0,0058
								Lanzarote	1,0000	0,0118
								Fuerteventura	1,0000	0,0118
		S/C de Tenerife	0,3333	0,0294	La Palma	0,0917	0,0027	Norte de La Palma	0,3716	0,0010
								Cumbres de La Palma	0,3716	0,0010
								Este de La Palma	0,0917	0,0002
								Oeste de La Palma	0,1651	0,0004
								Norte de La Gomera	0,5000	0,0030
								Sur de La Gomera	0,5000	0,0030
								Noreste de El Hierro	0,5000	0,0030
								Suroeste de El Hierro	0,5000	0,0030
Tenerife	0,4954	0,0146	Tenerife	0,4954	0,0146	Costa Norte de Tenerife	0,2000	0,0029		
						La Orotava y Vilaflor	0,2000	0,0029		
						Este, Sur y Oeste de Tenerife	0,6000	0,0087		
PRECIPITACIÓN	0,1639	0-60	0,0531	0,0087	VERDE		0,0087		0,0087	
		60-100	0,1148	0,0188	AMARILLO		0,0188		0,0188	
		100-180	0,2651	0,0434	NARANJA		0,0434		0,0434	
		>180	0,5670	0,0929	ROJO		0,0929		0,0929	
LLAMADAS	0,7478	Incremento 0-50%	0,0618	0,0462			0,0462		0,0462	
		Incremento 50-100%	0,2648	0,1980			0,1980		0,1980	
		Incremento >100%	0,6734	0,5036			0,5036		0,5036	
SUMAS	1,0000		3,0000	1,0000		2,0000	1,0000		7,0000	1,0000

Tabla 36: Valores de las diferentes prioridades locales y globales del árbol jerárquico.

Las prioridades definidas por el método AHP son:

Locales:

Cuelgan jerárquicamente de un mismo nodo.

Se calculan a partir de la información recogida en las matrices de comparación pareada (ya realizadas).

Las prioridades locales representan el peso relativo de los nodos dentro de cada grupo de hermanos con respecto a sus padres. Se puede observar fácilmente que las prioridades locales de cada grupo de criterios y sus hermanos subcriterios suman en total 1.

Para el caso propuesto se puede observar:

- Los tres criterios (zona, precipitación y llamadas) que cuelgan de un mismo nodo (objetivo) suman 1.
- Los dos subcriterios (Las Palmas y S/C de Tenerife) que cuelgan de un mismo nodo (zona) suman 1 y de idéntica manera todos los demás.

Globales:

Son las prioridades de cada nodo de la jerarquía respecto al nodo inicial (objetivo). AHP las calcula utilizando el principio de composición jerárquica [3], es decir, multiplicando los diferentes pesos que surgen en el camino de la jerarquía, desde el elemento menor hasta la meta.

Las prioridades globales se obtienen multiplicando las prioridades locales de los hermanos por la prioridad global de sus padres.

La prioridad global de todos los subcriterios en el nivel suma 1. Para el caso propuesto se puede observar que las prioridades globales de los diferentes niveles suman 1.

Dentro de una estructura jerárquica, las prioridades globales de los nodos hijos sumados siempre iguala a la prioridad global del padre. En los hijos las prioridades locales suman en total 1.

Totales o finales:

La prioridad total para las diferentes alternativas permitirá realizar la síntesis del problema, esto es, ordenar el conjunto de alternativas consideradas y seleccionar la más indicada para conseguir el objetivo propuesto.

Para la obtención de las prioridades totales de las diferentes alternativas en función de los criterios, y de su importancia, se realizan los siguientes pasos:

- Se construyen las matrices de comparación pareada de las alternativas entre sí, en función de cada uno de los criterios y se calculan los vectores propios de cada matriz, como se ha visto anteriormente. Se obtienen tantos vectores propios como criterios.
- Con los vectores propios obtenidos de las alternativas por cada uno de los criterios se construye una matriz.

Si se tiene una matriz cuadrada $n \times n$, de comparación pareada para las alternativas, siendo $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ el conjunto de alternativas y P el conjunto de vectores propios generados por cada matriz de alternativas en función de cada criterio $C = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$ entonces:

$$\begin{array}{cccc}
 & C_1 & C_2 & \dots & C_m \\
 A_1 & [P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1m}] \\
 A_2 & [P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2m}] \\
 \dots & [\dots & \dots & \dots & \dots] \\
 A_n & [P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nm}]
 \end{array}$$

Donde P_{ij} es el peso o la prioridad de la alternativa i con respecto al criterio j , siendo $i = \{1, 2, \dots, n\}$ y $j = \{1, 2, \dots, m\}$

- La matriz obtenida en el paso anterior se multiplica por el vector propio de los criterios y se obtiene un vector que proporciona la ponderación o pesos de las alternativas en función de los criterios y de su importancia.

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1m} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \cdots & P_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P'_1 \\ P'_2 \\ \cdots \\ P'_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{T1} \\ P_{T2} \\ \cdots \\ P_{Tn} \end{bmatrix}$$

Siendo P_{Ti} la ponderación o peso, total o final, de la alternativa $i=\{1,2,..n\}$ con respecto a los criterios.

Según Saaty [3] con el autovector y/o vector propio se obtienen las prioridades locales, con el principio de composición jerárquica las prioridades globales.

Las prioridades totales serán tratadas a través de la Lógica Difusa y no aplicando AHP.

Tal y como se expuso, primero se aplica AHP y se obtiene el conocimiento y después se fusifica ese conocimiento para utilizarlo en el sistema experto basado en Lógica Difusa. AHP se desarrolla para obtener prioridades y/o ponderaciones de criterios y subcriterios y con la Lógica Difusa se obtiene la alternativa ideal.

Analizando la tabla 36 y con respecto al criterio PRECIPITACIÓN se observa como el peso del 16,39% se obtiene de la comparación por pares de los diferentes criterios. Los pesos de la 2ª jerarquía de la comparación de los subcriterios y las prioridades globales, se obtienen de la multiplicación del hijo (prioridades locales) por el padre (variables primarias).

5.1.2.11. Resultados y conclusiones de la aplicación de AHP.

Según el conocimiento de los expertos, determinadas zonas de predicción meteorológica tienen más riesgo que otras ante idénticas precipitaciones y las dos grandes zonas se comportan de diferente manera.

Además, desde el punto de vista de Protección Civil, no son lo mismo una precipitación acumulada de 100 litros sobre un terreno determinado que esa precipitación se dé sobre ese mismo terreno con posterioridad a un incendio de grandes dimensiones. El conocimiento cambia y evoluciona y el sistema propuesto permite la actualización.

Para METEOALERTA [2] las dos grandes zonas se comportan de igual forma desde el punto de vista de los rangos de precipitación observados. Por lo tanto, se detecta una diferencia entre el Plan Nacional y la opinión de los expertos.

Para llegar a un mayor grado de detalle, y analizar si las diferencias observadas tienen un grado de consistencia significativo, se realiza una división de los rangos de precipitación relacionados en METEOALERTA [2] y se vuelve a repetir todo el proceso con los nuevos rangos.

Una división poco adecuada puede hacer perder información y una excesiva puede provocar el aumento de complejidad en la descripción del dominio. Por lo tanto, cada rango se divide en dos, teniendo en consideración al Plan Nacional y a la opinión de los expertos.

Con respecto a la Lógica Difusa, se debe recordar el concepto de granularidad de la incertidumbre [10], vista en el capítulo 4, y definida como el nivel de distinción entre los distintos niveles de incertidumbre contenida en las variables lingüísticas, de forma que se pueda representar correctamente la distinción que desea el usuario.

Una división no correcta al aplicar AHP trasladaría los problemas de pérdida de información o aumentos en la complejidad del problema a la posterior aplicación de la Lógica Difusa.

Por lo tanto, es necesario llegar siempre a un equilibrio en la división del dominio y considerarlo desde la aplicación de AHP.

Con la nueva división se obtienen los siguientes datos:

	1ª JERARQUÍA (VARIABLES PRIMARIAS)		2ª JERARQUÍA (prioridades locales)	Prioridades globales		3ª JERARQUÍA (prioridades locales)	Prioridades globales		4ª JERARQUÍA (prioridades locales)	Prioridades globales	
ZONA	0,0883	Las Palmas	0,6667	0,0589	Gran Canaria	0,6000	0,0353	Costa Norte de Gran Canaria	0,3716	0,0131	
								Medianías Norte de Gran Canaria	0,3716	0,0131	
								Cumbres de Gran Canaria	0,0917	0,0032	
								Este, Sur y Oeste de Gran Canaria	0,1651	0,0058	
								Lanzarote	1,0000	0,0118	
								Fuerteventura	1,0000	0,0118	
		S/C de Tenerife	0,3333	0,0294	0,0294	La Palma	0,0917	0,0027	Norte de La Palma	0,3716	0,0010
									Cumbres de La Palma	0,3716	0,0010
									Este de La Palma	0,0917	0,0002
									Oeste de La Palma	0,1651	0,0004
									Norte de La Gomera	0,5000	0,0030
									Sur de La Gomera	0,5000	0,0030
									Noreste de El Hierro	0,5000	0,0030
									Suroeste de El Hierro	0,5000	0,0030
									Consta Norte de Tenerife	0,2000	0,0029
									La Orotava y Vilaflor	0,2000	0,0029
Este, Sur y Oeste de Tenerife	0,6000	0,0087									
PRECIPITACIÓN	0,1639	40-60	0,0404	0,0066	VERDE	0,0066	0,0066	0,0066			
		60-80	0,0625	0,0102	AMARILLO	0,0102	0,0102	0,0102			
		80-100	0,0993	0,0163	AMARILLO	0,0163	0,0163	0,0163			
		100-120	0,1594	0,0261	NARANJA	0,0261	0,0261	0,0261			
		120-180	0,2511	0,0412	NARANJA	0,0412	0,0412	0,0412			
		>180	0,3874	0,0635	ROJO	0,0635	0,0635	0,0635			
LLAMADAS	0,7478	Incremento 0-50%	0,0618	0,0462		0,0462	0,0462				
		Incremento 50-100%	0,2648	0,1980		0,1980	0,1980				
		Incremento >100%	0,6734	0,5036		0,5036	0,5036				
SUMAS	1,0000		3,0000	1,0000		1,0000		7,0000	1,0000		

Tabla 37: Valores de las diferentes prioridades locales y globales del árbol jerárquico.

Cuando se compara precipitaciones con zona para obtener las ponderaciones correspondientes, se observan diferencias más evidentes. Para un mismo rango de precipitación, las diferencias entre las dos grandes zonas son observables, lo que evidencia la necesidad de cambio de los diferentes umbrales de METEOALERTA. Anteriormente a este trabajo, las dos zonas se trataban de igual manera y aunque nunca se había realizado un estudio similar se consideraba que los valores de las dos columnas (zona 1 y 2 en tabla 38) eran exactamente iguales.

Para comparar PRECIPITACIÓN ACUMULADA con ZONA se multiplica la prioridad global de la zona correspondiente por la prioridad global de la precipitación, todas en 2ª jerarquía (subcriterios). Se observa que a medida que la precipitación aumenta las diferencias entre zonas se hacen más patentes.

	Prioridades globales	ZONA 1 ISLAS ORIENTALES	ZONA 2 ISLAS OCCIDENTALES
40-60	0,0066	0,0004	0,0002
60-80	0,0102	0,0006	0,0003
80-100	0,0163	0,0010	0,0005
100-120	0,0261	0,0015	0,0008
120-180	0,0412	0,0024	0,0012
>180	0,0635	0,0037	0,0019

Tabla 38. Comparación de PRECIPITACIÓN ACUMULADA con ZONA.

Los expertos empiezan a valorar desde el punto de vista de protección civil los daños que pueden ocasionar las precipitaciones analizando la zona 2. Establecen los intervalos para la citada zona que cuando se aplican a la zona 1 dan como consecuencia la tabla con un nuevo código de colores (tabla 40). El resultado implica cambiar el Plan Nacional, METEOALERTA.

A simple vista y teniendo en cuenta la opinión de los expertos se proponen unos nuevos umbrales:

VERDE	$[0, 0.0003) = \{ x \in \mathbb{R} / x \geq 0 \wedge x < 0.0003 \}$
AMARILLO	$[0.0003, 0.0008) = \{ x \in \mathbb{R} / x \geq 0.0003 \wedge x < 0.0008 \}$
NARANJA	$[0.0008, 0.0019) = \{ x \in \mathbb{R} / x \geq 0.0008 \wedge x < 0.0019 \}$
ROJO	$[0.0019, 1] = \{ x \in \mathbb{R} / x \geq 0.0019 \wedge x \leq 1 \}$

Tabla 39: Nuevos umbrales.

	Prioridades globales	ZONA 1 ISLAS ORIENTALES	ZONA 2 ISLAS OCCIDENTALES
0-40			
40-60	0,0066	0,0004	0,0002
60-80	0,0102	0,0006	0,0003
80-100	0,0163	0,0010	0,0005
100-120	0,0261	0,0015	0,0008
120-180	0,0412	0,0024	0,0012
>180	0,0635	0,0037	0,0019

Tabla 40: Nuevos umbrales y nuevos códigos de colores.

Estos nuevos umbrales implican cambiar el Plan Nacional, METEOALERTA y el Plan Autonómico, PEFMA.

5.1.3. Aplicando la Lógica Difusa

Una vez aplicado AHP se pasa al proceso de fusificación [11], para ello se convierten los valores reales en valores difusos.

5.1.3.1. Sistema experto para la ayuda en la toma de decisiones basado en Lógica Difusa para el CECOES 1-1-2

Observando la figura 8 se puede comentar:

- **Interfaz de fusificación:** el sistema cuenta con una entrada de datos, que son los relativos al FMA. Los datos de entrada se preparan, es decir, se fusifican para ser tratados por el núcleo del sistema. La fusificación se encarga de convertir valores reales en valores difusos. Para esta interfaz deben estar definidos los rangos de variación de las variables de entrada y los conjuntos difusos asociados con sus funciones de pertenencia, que se obtienen tras aplicar AHP (ver 5.2.2.2 y 5.2.2.3).

- **Base de conocimientos (reglas difusas):** las reglas de las que dispone el motor de inferencia, para el caso de estudio, han sido deducidas de la base de conocimiento generada tras aplicar AHP y deben ser revisadas y ajustadas por los propios expertos. Una característica muy importante es que la base de conocimientos es independiente del mecanismo de inferencia que se utiliza para resolver el problema. De esta forma, cuando los conocimientos almacenados se han quedado obsoletos, o cuando se dispone de nuevos conocimientos, es relativamente fácil añadir reglas nuevas, eliminar las antiguas o corregir errores en las existentes. No es necesario reprogramar todo el Sistema Experto.
- **Motor de inferencia:** es un programa que controla el proceso de razonamiento que seguirá el Sistema Experto. Básicamente realiza tres operaciones: reconocer cuáles son las reglas aplicables, decidir cuál se va a aplicar y aplicarla. El motor de inferencia es el corazón del sistema experto. El cometido principal de este componente es el de sacar conclusiones aplicando el conocimiento a los datos. Utilizando los datos que se le suministran, recorre la base de conocimientos para alcanzar una solución. La estrategia de control es de encadenamiento progresivo, es decir, se comienza con los hechos disponibles en la base de datos, y se buscan reglas que satisfagan esos datos, es decir, reglas que verifiquen la parte SI. El motor de inferencia realiza la tarea de calcular las variables de salida, definidas en 5.2.2.2 y 5.2.2.4, a partir de las variables de entrada aplicando las reglas y la inferencia difusa, entregando conjuntos difusos de salida.
- **Interfaz de defusificación:** la defusificación se encarga de obtener valores reales a partir de la función de pertenencia de un conjunto difuso.
- Para la simulación, observación y análisis se utiliza Matlab.

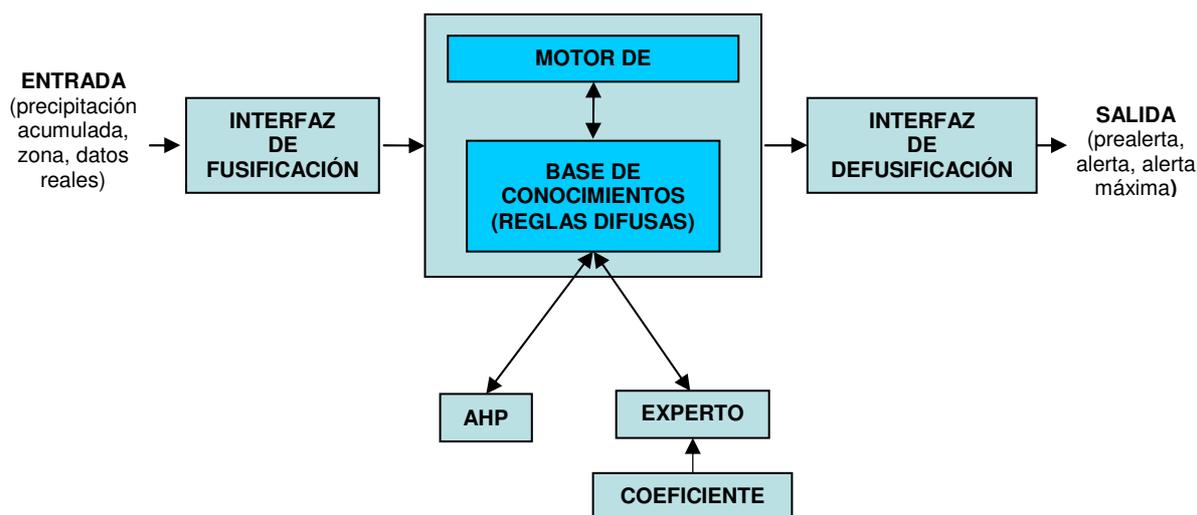


Figura 8: Sistema experto basado en un motor de inferencia en Lógica Difusa (elaboración propia)

5.1.3.2. Definición de las variables de entrada y salida del sistema experto

En primer lugar, se hace necesario explicar la relación que tienen las variables de entrada y los conjuntos difusos asociados con sus respectivas funciones de pertenencia con el PEFMA [1] y los avisos por FMA dados por la AEMET.

Para hacer frente a riesgos especiales se contempla la elaboración de planes especiales, PEFMA [1] para el caso de Fenómenos Meteorológicos Adversos.

Desde el 12 de Julio de 2006 está vigente en España el Plan Nacional de Predicción y Vigilancia de Meteorología Adversa, METEOALERTA [2], elaborado por el Instituto Nacional de Meteorología, hoy Agencia Estatal de Meteorología. Plan cuya última revisión data de fecha 27 de octubre de 2009.

El Plan Nacional de Predicción y Vigilancia de Meteorología Adversa, METEOALERTA [2], elaborado por la AEMET, prevé para Canarias como fenómenos meteorológicos: Viento, Lluvia, Nieve, Temperatura Extrema Mínima, Temperatura Extrema Máxima, Tormentas, Temporales Costeros y Tormentas Tropicales. METEOALERTA [2] establece los valores umbrales de referencia y los niveles de alerta para los fenómenos meteorológicos adversos que se consideran. El riesgo meteorológico está directamente relacionado con la “rareza” del fenómeno, y cuanto mayor es ésta, menos preparada está la población para enfrentarse a sus efectos. Este

sistema define cuatro niveles de alerta básicos, que se rigen por un código de colores: Verde, Amarillo, Naranja y Rojo.

- VERDE: no existe riesgo meteorológico.
- AMARILLO: no existe riesgo meteorológico para la población en general, pero sí para alguna actividad concreta. Este nivel no genera ningún aviso pero hace una llamada para que se esté atento a la predicción meteorológica en vigor.
- NARANJA: existe un riesgo meteorológico importante. (Fenómenos meteorológicos no habituales y con cierto grado de peligro para las actividades usuales).
- ROJO: el riesgo meteorológico es extremo. (Fenómenos meteorológicos no habituales de intensidad excepcional y con un nivel de riesgo para la población muy alto)

El valor umbral para un fenómeno meteorológico indica la intensidad mínima, a partir de la cual, dicho fenómeno es capaz de producir daños a las personas o materiales considerables.

Por ejemplo, para una precipitación acumulada prevista en 12 horas de 120 mm en una zona geográfica determinada (supera el umbral del naranja que es de 100 mm), la AEMET genera un aviso naranja. Para el caso propuesto se trabaja sólo con lluvias y con la precipitación acumulada, ya que el planteamiento sería similar para precipitaciones previstas en 1 hora (intensidad), vientos, etc.

METEOALERTA [2] divide a CANARIAS en 17 zonas de predicción meteorológica: Norte de la Palma; Cumbres de la Palma; Este de la Palma; Oeste de la Palma; Norte de la Gomera; Sur de la Gomera; Nordeste del Hierro; Suroeste del Hierro; Costa norte de Tenerife; La Orotava y Vilaflor; Este, sur y oeste de Tenerife; Costa Norte de Gran Canaria; Medianías del norte de Gran Canaria; Cumbres de Gran Canaria; Este, sur y oeste de Gran Canaria; Lanzarote; y Fuerteventura.

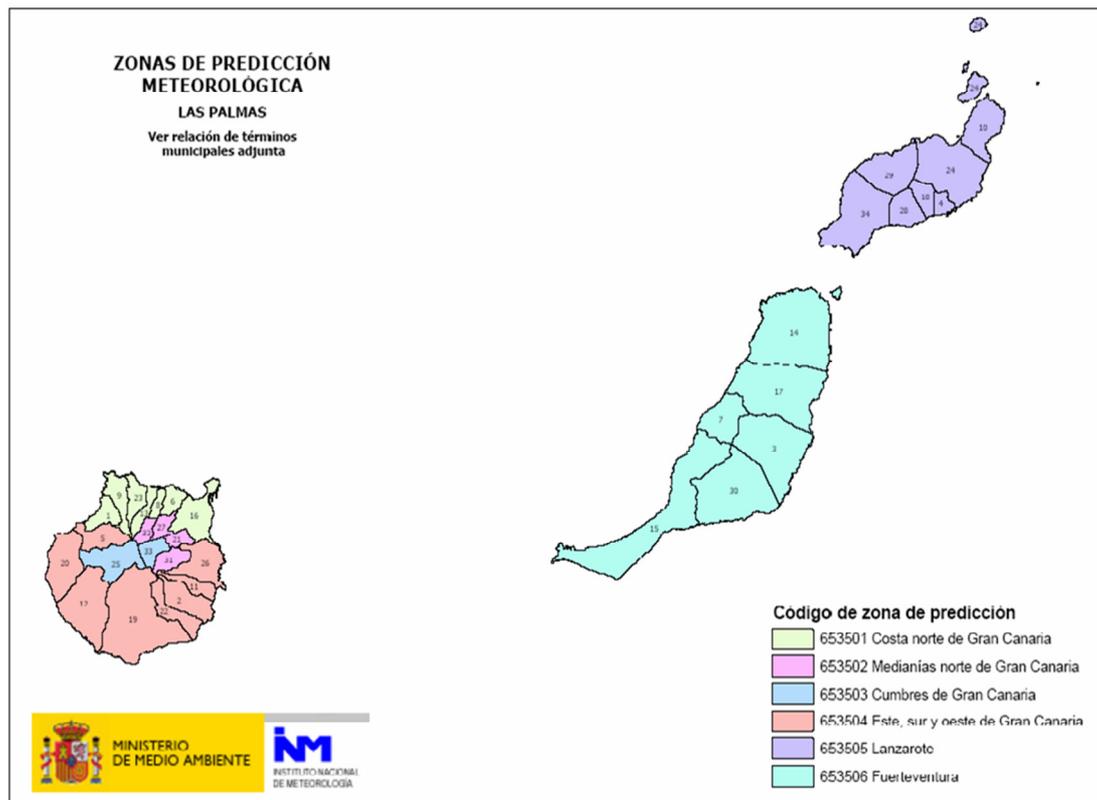
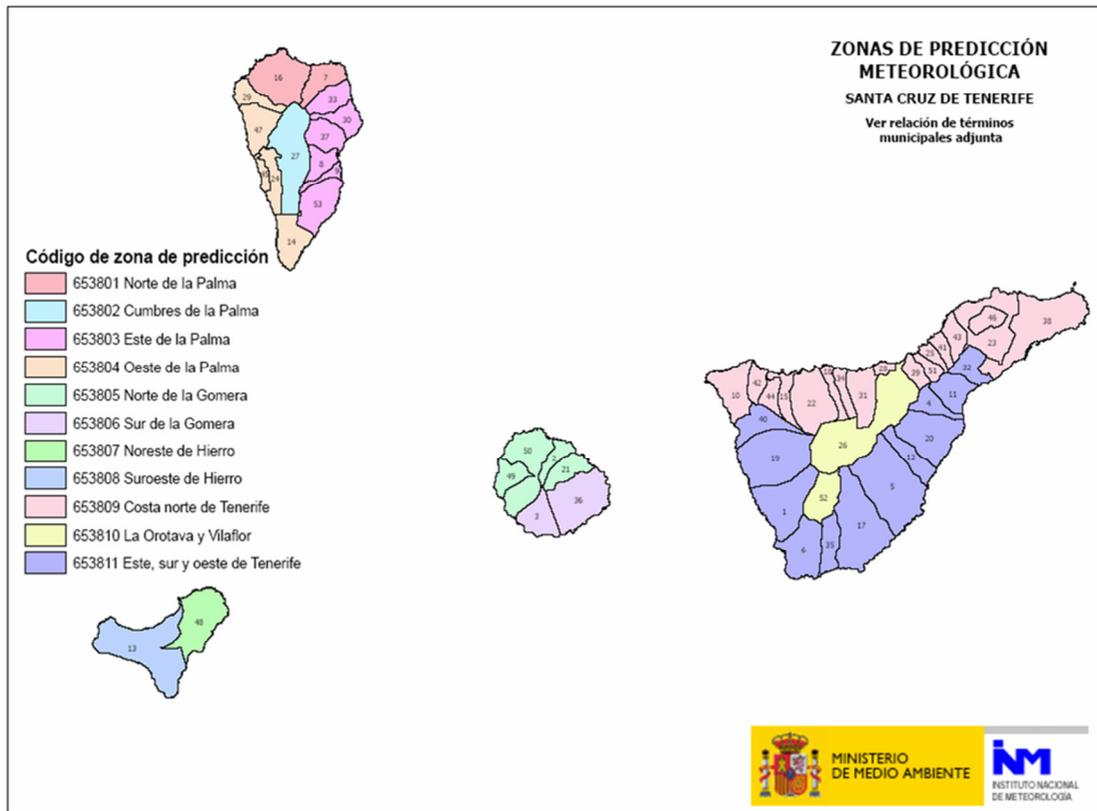


Figura 9: Zonas de predicción meteorológica. ©Agencia Estatal de Meteorología

La AEMET sólo genera avisos específicos cuando se prevé alcanzar los niveles “naranja” ó “rojo”. Tal y como se comentó anteriormente, el valor umbral de referencia para un fenómeno meteorológico indica la intensidad mínima, a partir de la cual, dicho fenómeno es capaz de producir daños a las personas o daños materiales de consideración.

UMBRALES Y NIVELES DE AVISO PARA LAS VARIABLES: TEMPERATURAS MÁXIMAS Y MÍNIMAS, VIENTOS, PRECIPITACIONES EN 12 H Y 1 H Y NEVADAS

A continuación se muestra la tabla de umbrales que afectan a las islas Canarias en sus 17 zonas de predicción meteorológica.

umbrales		temperaturas máximas			temperaturas mínimas			vientos			precipitación 12h			precipitación 1h			nevadas en cm			
CODIGO	NOMBRE DE LA ZONA	PROVINCIA	amlo	naranja	rojo	amlo	naranja	rojo	amlo	naranja	rojo	amlo	naranja	rojo	amlo	naranja	rojo	amlo	naranja	rojo
653501	Costa norte de Gran Canaria	Las Palmas	34	37	40	-1	-4	-8	70	90	130	60	100	180	15	30	60	2	5	20
653502	Medianías norte de Gran Canaria	Las Palmas	34	37	40	-1	-4	-8	70	90	130	60	100	180	15	30	60	2	5	20
653503	Cumbres de Gran Canaria	Las Palmas	34	37	40	-1	-4	-8	70	90	130	60	100	180	15	30	60	2	5	20
653504	Este, sur y oeste de Gran Canaria	Las Palmas	34	37	40	-1	-4	-8	70	90	130	60	100	180	15	30	60	2	5	20
653505	Lanzarote	Las Palmas	34	37	40	-1	-4	-8	70	90	130	60	100	180	15	30	60	2	5	20
653506	Fuerteventura	Las Palmas	34	37	40	-1	-4	-8	70	90	130	60	100	180	15	30	60	2	5	20
653801	Norte de la Palma	Costa Cruz de Tenerife	34	37	40	-1	-4	-8	70	90	130	60	100	180	15	30	60	2	5	20
653802	Cumbres de la Palma	Costa Cruz de Tenerife	34	37	40	-1	-4	-8	70	90	130	60	100	180	15	30	60	2	5	20
653803	Este de la Palma	Costa Cruz de Tenerife	34	37	40	-1	-4	-8	70	90	130	60	100	180	15	30	60	2	5	20
653804	Oeste de la Palma	Costa Cruz de Tenerife	34	37	40	-1	-4	-8	70	90	130	60	100	180	15	30	60	2	5	20
653805	Norte de la Gomera	Costa Cruz de Tenerife	34	37	40	-1	-4	-8	70	90	130	60	100	180	15	30	60	2	5	20
653806	Sur de la Gomera	Costa Cruz de Tenerife	34	37	40	-1	-4	-8	70	90	130	60	100	180	15	30	60	2	5	20
653807	Noreste del Hierro	Costa Cruz de Tenerife	34	37	40	-1	-4	-8	70	90	130	60	100	180	15	30	60	2	5	20
653808	Suroeste del Hierro	Costa Cruz de Tenerife	34	37	40	-1	-4	-8	70	90	130	60	100	180	15	30	60	2	5	20
653809	Costa norte de Tenerife	Costa Cruz de Tenerife	34	37	40	-1	-4	-8	70	90	130	60	100	180	15	30	60	2	5	20
653810	La Orotava y Vilaflor	Costa Cruz de Tenerife	34	37	40	-1	-4	-8	70	90	130	60	100	180	15	30	60	2	5	20
653811	Este, sur y oeste de Tenerife	Costa Cruz de Tenerife	34	37	40	-1	-4	-8	70	90	130	60	100	180	15	30	60	2	5	20

Tabla 41: Tabla umbrales y niveles de aviso AEMET (fuente METEOALERTA [2])

Resumiendo:

1. El aviso por FMA (código de colores) es responsabilidad de la AEMET en base a METEOALERTA [2]. Competencia Estatal.
2. La información recibida en el CECOES 1-1-2 de la AEMET sirve para la declaración de prealerta, alerta o alerta máxima por parte de la DGSE en base al PEFMA [1], un plan de protección civil. Competencia autonómica.

Se observa ahora el diagrama de bloques, el cual internamente está formado por dos subsistemas, en cascada, que se verán posteriormente (Fig. 5.5). Este diseño permite realizar la declaración de prealerta, alerta o alerta máxima solo con la predicción meteorológica, antes de dar comienzo el FMA, y con la aparición de datos reales subir o bajar el nivel de declaración.

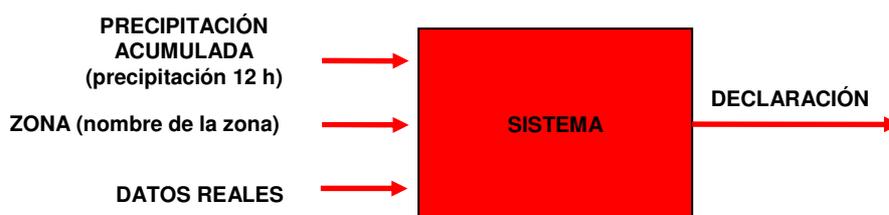


Figura 10: “Sistema Experto CECOES 1-1-2”(elaboración propia)

El sistema se comporta de la siguiente manera:

- Las variables de entrada son: PRECIPITACIÓN ACUMULADA y ZONA, proporcionadas por la AEMET; DATOS REALES, que aparecen cuando el FMA está en curso y que entran a través del CECOES 1-1-2.
- La variable de salida es DECLARACIÓN (prealerta, alerta o alerta máxima) y determina una serie de acciones a ejecutar por los servicios de seguridad y emergencias.
- En una primera fase, antes de que el FMA comience, se trabaja solo con la predicción meteorológica de la AEMET y en base a ella se realiza la DECLARACIÓN. Recordar que la Lógica Difusa es eficaz cuando se trabaja con imprecisión o ambigüedad, datos erróneos o ausencia de estos (aún no se disponen de datos reales).

- El proceso se inicia con la recepción del primer boletín emitido de la AEMET y se ejecutará tantas veces como boletines se reciban.
- En una segunda fase, con el FMA en curso y con DATOS REALES que alimentan el sistema puede cambiar la situación (alerta a alerta máxima).

Internamente:

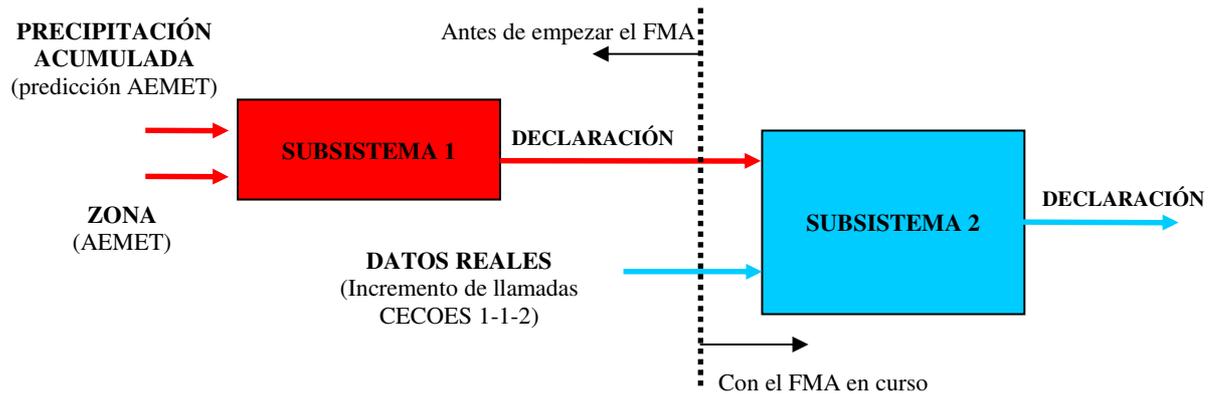


Figura 11: “Sistema Experto CECOES 1-1-2 con los diferentes subsistemas” (elaboración propia)

La variable de salida DECLARACIÓN del SUBSISTEMA 2 es igual a la variable de salida DECLARACIÓN del SUBSISTEMA 1 si no existen DATOS REALES.

Tal y como se expuso AHP está basado en la obtención de pesos de importancia para criterios y subcriterios mediante la comparación por pares, basándose en la escala numérica de Saaty (del 1 al 9) [3]. A partir de ahí se generan prioridades locales, globales y totales de las jerarquías.

La prioridad total permite realizar la síntesis del problema, esto es, ordenar el conjunto de alternativas consideradas y seleccionar las más indicada para conseguir el objetivo propuesto.

En esta tesis se ha variado la metodología AHP en dos aspectos:

1. No desarrollando el método hasta alcanzar la alternativa ideal, mediante la obtención de las prioridades totales, sino calculando las prioridades locales y globales dejando la elección de la alternativa ideal al motor de inferencia difuso.

2. Modificar la tradicional metodología AHP Fuzzy [11] para simplificar cálculos con los conjuntos difusos. Primero se aplica AHP y se obtiene el conocimiento y después se fusifica ese conocimiento para utilizarlo en el sistema experto basado en Lógica Difusa.

Un conjunto difuso A en un dominio D viene caracterizado por una función de pertenencia que asocia a cada elemento del dominio, un valor en el intervalo [0 1], lo que determina su grado de pertenencia al conjunto. Si la función de pertenencia toma valores próximos a cero se indica poca pertenencia por parte del elemento al conjunto y valores próximos a 1 indican una alta o elevada pertenencia.

Una vez aplicado AHP, como se ha expuesto, se pasa al proceso de fusificación [11].

Escogidas las variables de entrada se establecen las divisiones del universo de discurso de las citadas variables y se escogen las funciones de pertenencia que se utilizarán para la realización de dichas divisiones.

Definir una función de pertenencia particular depende de cada contexto [78]. Se ha recurrido a funciones de pertenencia del tipo:

- Función triangular, la cual cuenta con tres puntos característicos:
 1. Un punto inicial donde se comienza la pendiente positiva. Este punto viene influenciado por la función de pertenencia adyacente, ya que debe existir un solapamiento entre ambas. No existe rigidez sobre el solapamiento de las funciones de pertenencia y dependerá en muchas ocasiones del problema tratado, así Sherestha [75] recomienda un 25% de solape con cada una de las funciones de pertenencia adyacentes para un modelo basado en reglas difusas para un embalse multiuso, que recoge también en su estudio sobre la gestión de embalses y ríos en España, Macián [74].

García et al [83] en el desarrollo de un modelo de evaluación de proveedores apuestan por el ajuste experto: “.....Estos valores umbrales (crisp o borrosos) podrían ser ajustados en cada empresa o sector específico a partir del conocimiento experto recabado sobre el mismo”.

Vélez [84] en “Metodología para mantener la interpretabilidad en el modelado utilizando sistemas borrosos” propone una metodología para elegir la razón de solape a partir del grado de pertenencia del solape de funciones de pertenencia adyacentes.

En su trabajo Vélez [84] comenta que entre las reglas que deben cumplir las funciones de pertenencia para suponer que están bien distribuidas en el universo de discurso se encuentran:

- No debe haber dos funciones con el mismo punto de máximo grado de pertenencia.
- Si se solapan dos funciones la suma de los grados de pertenencia para cualquier punto en el solape debe ser ≤ 1 .
- El solape no tiene que atravesar el punto de máximo grado de pertenencia de cualquiera de las funciones.

El mayor o menor solape de las funciones de pertenencia tendrá consecuencias directas sobre que el paso de una función de pertenencia a otra sea gradual o no, lo que puede provocar que se dispare o no una determinada regla y por lo tanto que el sistemas no funcione correctamente. Los solapes han sido probados y ajustados mediante MATLAB.

2. Un punto central donde la pendiente positiva cambia a negativa. El punto o valor central de una función de pertenencia implica la máxima pertenencia por parte del elemento al conjunto (1), que se ha hecho coincidir con el máximo peso de la variable con respecto a toda la jerarquía AHP (prioridad global).
 3. Un punto final donde acaba la pendiente negativa. Este punto viene influenciado por la función de pertenencia adyacente, con idénticas características que el punto inicial.
- Función trapezoidal, para los extremos del universo de discurso. Estas funciones, no acotadas en un extremo hacen que el valor de pertenencia permanezca constante (1) en la parte no acotada. Para la parte acotada se tienen dos puntos característicos:

1. Un punto final o inicial dependiendo del caso. Si es final donde acaba la pendiente negativa y si es inicial donde comienza la positiva. Para ambos casos este punto viene influenciado por la función de pertenencia adyacente, ya que debe existir un solapamiento entre ambas.
2. Un punto central donde de un valor constante (1) comienza la pendiente negativa o donde finaliza una pendiente positiva para pasar a un valor constante (1). El punto o valor central corresponde a la prioridad global de la variable.

El particionado del universo de discurso tiene relación directa con las reglas que definen el modelo difuso y aunque se suelen usar varios métodos [73] dos son los que se van a utilizar, en combinación uno con otro:

- Particionado experto: consiste en dividir el universo de discurso en base al conocimiento experto. Si el sistema no es muy complejo y el conocimiento es suficientemente preciso, es posible dividir el universo de discurso con bastante exactitud [10].
- Particionado uniforme: consiste en dividir el universo de discurso de las variables de entrada en fracciones iguales mediante funciones de pertenencias idénticas y simétricas. Normalmente las funciones de pertenencia se distribuyen de forma que no exista solape con más de una función a la vez, lo que facilita poder interpretar el modelo con eficiencia [75] [74].

5.1.3.2.1. La importancia de los solapes en las funciones de pertenencia

Tal y como se ha comentado anteriormente el solapamiento de las funciones de pertenencia depende en muchas ocasiones del problema tratado. Para el caso de estudio el que no se dispare una determinada regla como consecuencia de un solapamiento inadecuado puede ocasionar graves consecuencias (no pasar de alerta a alerta máxima).

Recordar que la inferencia difusa es el proceso por el que se obtiene un valor de salida con un valor de entrada empleado la Lógica Difusa. De los modelos existentes, en la presente tesis se ha trabajado con el modelo Mamdani [79] [80], que realiza el proceso en cuatro grandes pasos:

- Fusificación de las variables de entrada.
- Evaluación de las reglas.
- Agregación de las salidas de las reglas.
- Defusificación.

Como ejemplo de un solapamiento inadecuado se supone que se ha declarado una situación de alerta y comienzan a entrar datos reales (FMA en curso). Las llamadas que se reciben están superando el 100% de incremento con respecto a un día normal, lo que supone un cambio de alerta a alerta máxima.

Se trabaja con el SUBSISTEMA 2, cuya base de conocimiento lo componen doce reglas difusas.

Aplicando Mamdani [79] [80]:

1. Fusificación: tal y como se comentó en el punto 4.2 el interfaz de fusificación transforma las variables de entrada en variables difusas [7] [8].

Partiendo de los valores de las variables de entrada para el SUBSISTEMA 2, asignados por un experto, de 44 para la variable LLAMADAS y 0.13 para DECLARACIÓN, se va a realizar el proceso de inferencia. Cualquier valor elegido tiene que estar limitado al universo de discurso de la variable correspondiente.

Según Bellman y Zadeh [81] un conjunto difuso A en X se identifica por un conjunto de pares ordenados:

$$A = \left\{ \left(x, \mu_A(x) \right) \right\}, x \in X$$

Los valores de $\mu_A(x)$ están comprendidos en el intervalo [0,1] y representan el grado de pertenencia o membresía de x en A..

Para el caso de estudio:

- El valor 44 implica a dos funciones de pertenencia de la variable de entrada LLAMADAS: INCREMENTO 50-100 e INCREMENTO SUP-100.

- El valor 0.13 implica a una función de pertenencia de la variable de entrada DECLARACIÓN: ALERTA.

Se calcula, para los valores asignados por el experto, los grados de pertenencia de las diferentes funciones.

$$\mu_{\text{INCREMENTO 50-100}}(44) = 0.2$$

$$\mu_{\text{INCREMENTO SUP 100}}(44) = 0.4$$

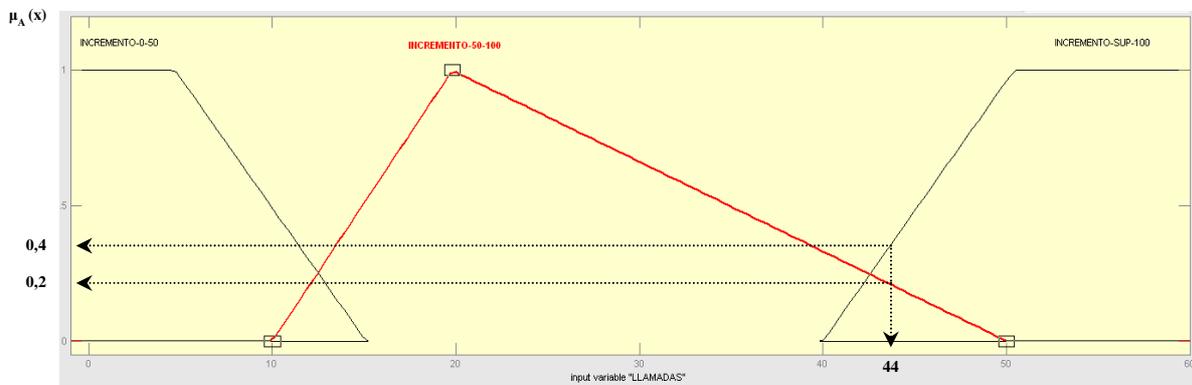


Figura 12: Variable de entrada, LLAMADAS, con solapamiento inadecuado.

Para la variable de entrada DECLARACIÓN el valor elegido del universo de discurso es el que proporciona el máximo grado de pertenencia.

$$\mu_{\text{DECLARACIÓN}}(0.13) = 1$$

2. Evaluación de las reglas: tomando las entradas anteriores se aplican las reglas difusas.

Una regla difusa se expresa como: IF (proposición difusa) THEN (proposición difusa).

El antecedente y el consecuente de una regla difusa pueden tener varias partes. En sistemas fuzzy [7] [8] donde el antecedente es difuso, todas las reglas se ejecutan

parcialmente, y el consecuente es cierto con un determinado grado (si el antecedente es cierto con determinado grado de pertenencia, el consecuente es cierto también el determinado grado).

En los antecedentes con varias partes se aplican operadores difusos del tipo AND ó OR, en este caso se aplica AND.

Para la operación AND existen dos formas conocidas como mín (mínimo) y prod (producto algebraico), para OR máx (máximo) y sum (suma algebraica).

Según Bellman y Zadeh [81]:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \text{mín} [\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

Donde mín (a, b) = a si se cumple que $a \leq b$ y mín (a, b) = b si se cumple que $a > b$

pudiendo usar la forma simplificada: $\mu_{A \cap B} = \mu_A \wedge \mu_B$

De las doce reglas difusas que forman la base de conocimiento del SUBSISTEMA 2 solo dos se disparan, la siete y la once.

IF (LLAMADAS is INCREMENTO 50-100) and (DECLARACIÓN IS ALERTA)
THEN (DECLARACIÓN IS ALERTA).

$$\mu_{\text{INCREMENTO 50-100} \cap \text{DECLARACIÓN}}(x) = \text{mín} [0.2, 1] = 0.2$$

IF (LLAMADAS is INCREMENTO SUP-100) and (DECLARACIÓN IS ALERTA)
THEN (DECLARACIÓN IS ALERTA MÁXIMA).

$$\mu_{\text{INCREMENTO SUP-100} \cap \text{DECLARACIÓN}}(x) = \text{mín} [0.4, 1] = 0.4$$

El resto de reglas no se disparan ya que sus $\mu_{A,B}(x) = 0$

NÚMERO	REGLA DIFUSA	$\mu(x)$
7	IF LLAMADAS is INCREMENTO 50-100 (0.25) and DECLARACIÓN IS ALERTA (1) THEN DECLARACIÓN IS ALERTA	0.2
11	IF LLAMADAS is INCREMENTO SUP-100 (0.37) and DECLARACIÓN IS ALERTA (1) THEN DECLARACIÓN IS ALERTA MÁXIMA	0.4
1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9,10	IF (proposición difusa) THEN (proposición difusa)	0

Tabla 42: Resumen reglas difusas con sus grados de pertenencia para un solape inadecuado.

3. Agregación de las salidas de las reglas: una vez evaluadas las reglas aplicadas se realiza el proceso de agregación de los consecuentes. Se combinan las funciones de pertenencia de todos los consecuentes escalados con el objetivo de obtener un único conjunto difuso (zona rallada fig 5.7).

Las reglas 7 y 11 afectan a diferentes salidas por lo que no hay competencia entre ellas. Si dos reglas influyen sobre la misma salida se elegiría la mayor, el máximo.

El método usado es el conocido como inferencia MIN-MAX, ya que como se vio se aplica el mínimo de los antecedentes y el máximo para elegir la regla con mayor fuerza para cada consecuente.

$$\mu_A(x) = \text{máx} [\mu_{A_1}(x), \mu_{A_2}(x), \dots, \mu_{A_n}(x)] = 0.2$$

$$\mu_B(x) = \text{máx} [\mu_{B_1}(x), \mu_{B_2}(x), \dots, \mu_{B_n}(x)] = 0.4$$

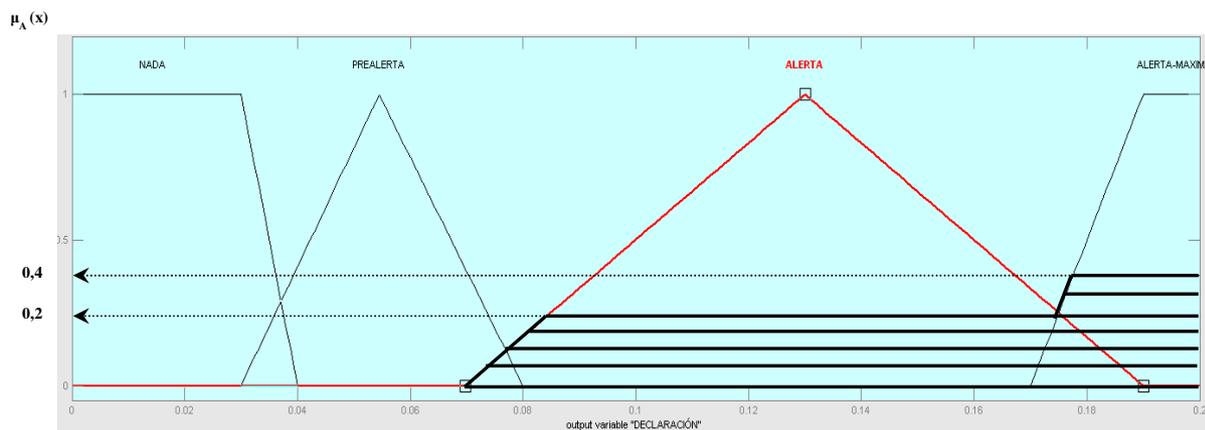


Figura 13: Los conjuntos difusos que representan las salidas de cada regla son combinados en un único conjunto difuso.

- Defusificación: el resultado final que se busca, el valor de x , indicará si la variable de salida proporciona una ALERTA o ALERTA MÁXIMA. El método usado es el centroide, que calcula el punto donde una línea vertical divide el conjunto difuso en dos áreas con igual masa.

Se divide la función en partes iguales y se calcula realizando la sumatoria de todos los puntos aplicando la siguiente formula:

$$\text{Centroide} = \frac{\sum_{i=0}^n \mu(x)_i \cdot x_i}{\sum_{i=0}^n \mu(x)_i} = 0.145$$

Como el solape ha sido excesivo la salida del sistema no cambia.

La variable declaración toma el valor 0.145, que observando la tabla 49 (donde se define la variable de salida declaración) no pasa a alerta máxima.

Se prueba ahora con un solape con ajuste experto.

Aplicando los mismos pasos que para el caso de solape inadecuado se obtiene:

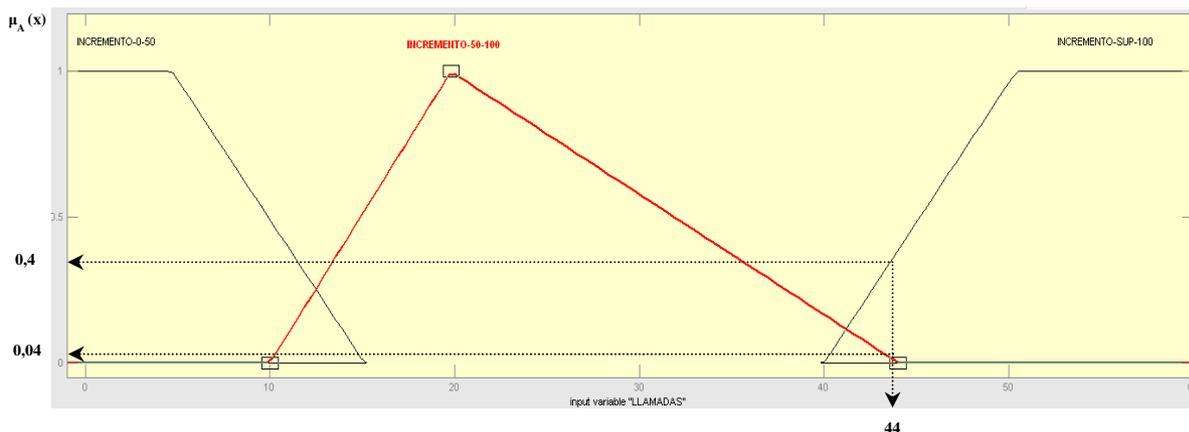


Figura 14: Variable de entrada, LLAMADAS, con solapamiento adecuado.

NÚMERO	REGLA DIFUSA	$\mu(x)$
7	IF LLAMADAS is INCREMENTO 50-100 (0.01) and DECLARACIÓN IS ALERTA (1) THEN DECLARACIÓN IS ALERTA	0.04
11	IF LLAMADAS is INCREMENTO SUP-100 (0.37) and DECLARACIÓN IS ALERTA (1) THEN DECLARACIÓN IS ALERTA MÁXIMA	0.4
1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9,10	IF (proposición difusa) THEN (proposición difusa)	0

Tabla 43: Resumen reglas difusas con sus grados de pertenencia para un solape adecuado.

$$\text{Centroide} = \frac{\sum_{i=0}^n \mu(x)_i \cdot x_i}{\sum_{i=0}^n \mu(x)_i} = 0.171$$

La variable declaración toma el valor 0.171, que observando la tabla 49 es una alerta máxima.

Probando diferentes solapes de la función de pertenencia INCREMENTO 50-100 se tiene:

$\mu_{\text{INCREMENTO 50-100}}(x)$	Centroide	DECLARACIÓN
0.01	0.184	ALERTA MÁXIMA
0.02	0.180	ALERTA MÁXIMA
0.03	0.175	ALERTA MÁXIMA
0.04	0.171	ALERTA MÁXIMA
0.05	0.168	ALERTA
0.08	0.160	ALERTA
0.1	0.157	ALERTA
0.2	0.145	ALERTA
0.5	0.133	ALERTA
0.6	0.130	ALERTA
0.7	0.130	ALERTA
0.8	0.130	ALERTA
0.9	0.130	ALERTA

Tabla 44: Calculo de los valores del centroide.

Analizando la tabla anterior conjuntamente con la tabla 49 se observa:

- Si el solape aumenta se incrementa $\mu_{\text{INCREMENTO 50-100}}(x)$ y disminuye el del Centroide.
- Si el solape disminuye el valor de $\mu_{\text{INCREMENTO 50-100}}(x)$ decrece y aumenta el del Centroide.
- Existe un par de valores frontera (para el valor 44 proporcionado por el experto) que determinan el valor mínimo para una salida válida. En este caso sería el siguiente par de valores

$$(\mu_{\text{INCREMENTO 50-100}}(x), \text{Centroide}) = (0.04, 0.171)$$

Por lo tanto, los solapes se ajustan con el conocimiento experto (recordar particionado experto y base de conocimientos generada con AHP) y determinan cuando actúa una determinada regla del sistema para que la salida proporcionada por el modelo sea una salida válida.

El solape mínimo entre las funciones de pertenencia se ha ajustado de tal manera que se asegura una salida válida. En todo momento se garantiza que una regla está actuando sobre el conjunto de variables de entrada.

Todos los solapes no son iguales, ya que se parte de un particionado del universo de discurso no uniforme (particionado experto), por lo que las pendientes de las funciones de pertenencia son diferentes.

Se observa que con el menor solape el sistema funciona correctamente.

Teniendo en cuenta lo anterior es necesario definir una serie de conceptos básicos:

- Mínimo solape para salida valida (MSSVD y MSSVI):

Solape mínimo de una función de pertenencia con su adyacente que asegura una salida válida Si el solape es con la función adyacente lateral derecha, MSSVD, y si es con la lateral izquierda, MSSVI.

- Coeficiente de solape (CS):

Si una determinada variable de entrada V viene caracterizada:

1. Por un conjunto de funciones de pertenencia V_i donde $i = \{1, 2, \dots, n\}$.
2. Por un valor extremo izquierdo α y un valor extremo derecho β , entonces:

$$CS_i = \frac{(\beta_{i-1} - \alpha_i) + (\beta_i - \alpha_{i+1})}{(\beta_i - \alpha_i)} = MSSVI_i + MSSVD_i$$

Lo que gráficamente se representa:

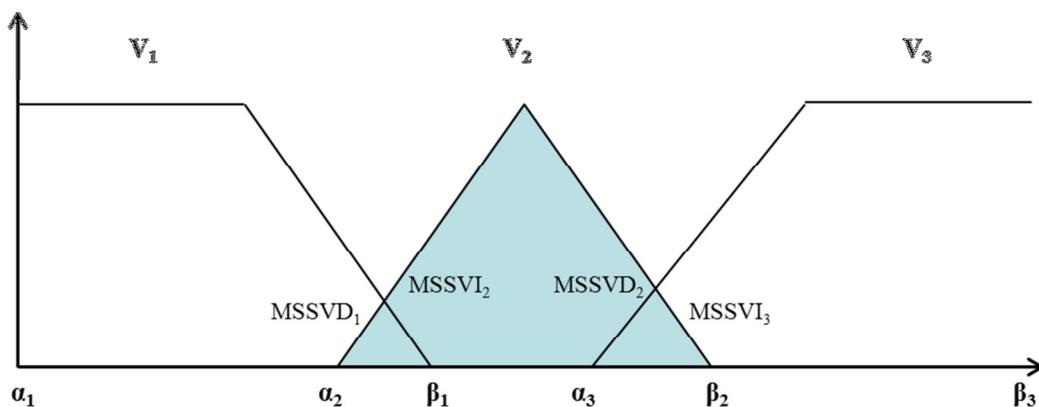


Figura 15: Coeficiente de solape, CS (elaboración propia).

- Grado relativo de solape (GRS):

Representa el solape total (MSSVDI + MSSVD) de una determinada función de pertenencia con respecto al solape del resto de funciones de pertenencia de la misma variable de entrada.

Si una determinada variable de entrada V viene caracterizada:

1. Por un conjunto de funciones de pertenencia V_i donde $i = \{1, 2, \dots, n\}$.
2. Por CS_i que representa el mínimo solape de V_i con sus funciones adyacentes, siendo $CS_i = MSSV_i + MSSVD_i$ entonces:

$$GRS_i = \frac{CS_i}{\sum_{i=1}^n CS_i}$$

- Razón de solape (RS):

Según Vélez [84] la razón de solape entre dos funciones de pertenencia adyacentes viene caracterizada por:

$$RS = \frac{RnS}{RfA}$$

Para Vélez [84] el RnS , Rango de Solape, es el intervalo del universo de discurso donde dos funciones de pertenencia adyacentes poseen un soporte común. Por otro lado, el RfA , Rango de Definición de Funciones Adyacentes, es el soporte generado por las dos mismas funciones de pertenencia adyacentes.

Teniendo en cuenta las definiciones de Vélez [84] y especificando un conjunto de funciones de pertenencia V_i , donde $i = \{1, 2, \dots, n\}$ y V_j , donde $j = \{1, 2, \dots, n\}$, siendo V_j las funciones adyacentes de V_i se tiene:

$$RS_{i,j} = \frac{RnS_{i,j}}{RfA_{i,j}}$$

$$RS_{1,2} = \frac{RnS_{1,2}}{RfA_{1,2}} = \frac{\beta_1 - \alpha_2}{\beta_2 - \alpha_1}$$

Lo que gráficamente se representa:

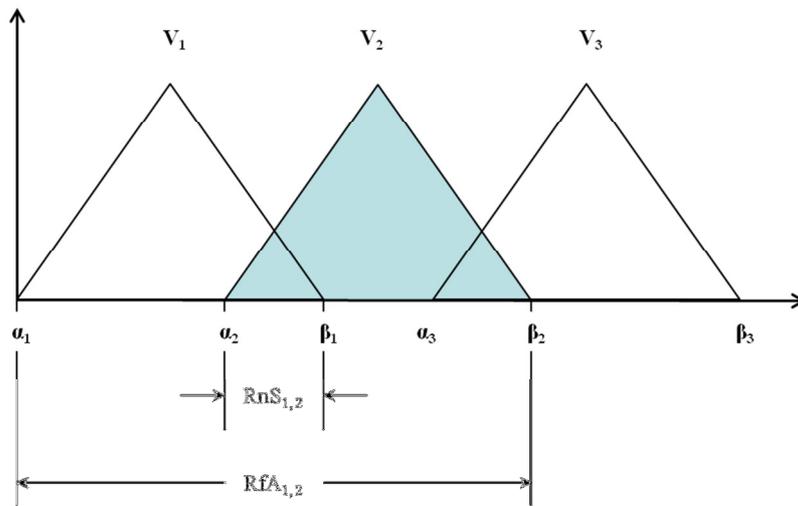


Figura 16: Razón de solape, RS (elaboración propia).

- Grado de pertenencia de solape (GPS):

Valor de $\mu(x)$ en el punto de cruce de dos funciones de pertenencia con solape.

Vélez [84] en su trabajo propone una metodología para elegir la razón de solape a partir del grado de pertenencia del solape de funciones de pertenencia adyacentes

Lo que gráficamente se representa:

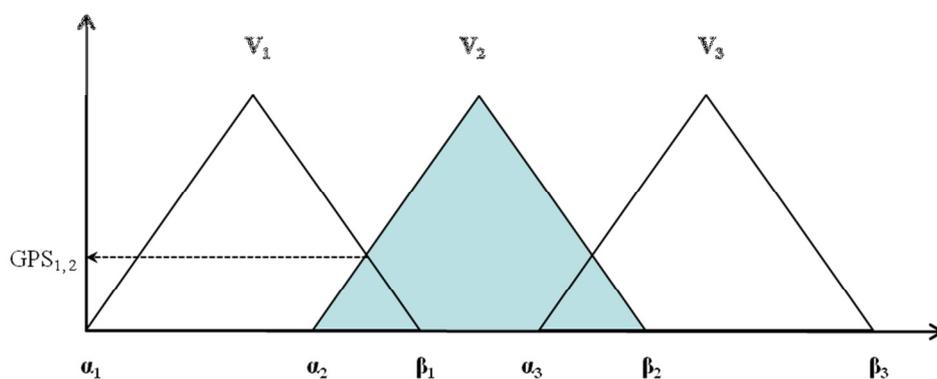


Figura 17: Grado de pertenencia de solape, GPS (elaboración propia).

Se calculan los MSSVD, MSSVI, GRS, CS y RS de las diferentes funciones de pertenencia y se obtiene la siguiente tabla:

		FUNCIÓN DE PERTENENCIA	MSSVI	MSSVD	GRADO RELATIVO DE SOLAPE (GRS)	COEFICIENTE DE SOLAPE (CS)	RS _{i,j}	RAZÓN DE SOLAPE (RS)
PRECIPITACIÓN ACUMULADA	Nada precipitación	(-10, -10, 0.26, 0.50)	Trapezoidal (*)	1,14%	0,40%	1,14%	RS _{1,2}	1,10%
	Poca precipitación	(0.38, 0.66, 0.91)	22,64%	22,64%	16,01%	45,28%	RS _{2,3}	13,95%
	Media precipitación	(0.79, 1.02, 1.24)	26,67%	62,22%	31,44%	88,89%	RS _{3,4}	18,54%
	Media alta precipitación	(0.96, 1.63, 2.30)	20,90%	21,64%	15,04%	42,54%	RS _{4,5}	12,89%
	Alta precipitación	(2.01, 2.61, 3.21)	24,17%	37,50%	21,81%	61,67%	RS _{5,6}	12,97%
	Muy alta precipitación	(2.76, 4.12, 5.48)	16,54%	17,28%	11,96%	33,82%	RS _{6,7}	6,49%
	Altísima precipitación	(5.01, 6.35, 10, 10)	9,42%	Trapezoidal (*)	3,33%	9,42%	-	-
LLAMADAS	Incremento 0-50%	(-10 -10 4.62 15)	Trapezoidal (*)	20,00%	33,44%	20,00%	RS _{1,2}	9,26%
	Incremento 50-100%	(10 19.80 44)	14,70%	11,76%	44,27%	26,46%	RS _{2,3}	6,67%
	Incremento >100%	(40, 50.36, 70, 70)	13,33%	Trapezoidal (*)	22,30%	13,33%	-	-
ZONA	Las Palmas	(3.67, 5.89, 10, 10)	26,70%	Trapezoidal (*)	70,82%	26,70%	RS _{1,2}	8,45%
	S/C de Tenerife	(-10 -10 2.94 5.36)	Trapezoidal (*)	11,00%	29,18%	11,00%	RS _{1,2}	1,10%

Tabla 45: Tabla resumen con los valores de MSSVD, MSSVI, GRS, CS y RS de las diferentes funciones de pertenencia.

De todo lo anteriormente expuesto se extraen las siguientes conclusiones:

Vélez [84] en su trabajo define la Razón de Solape, Factor de Ancho, Razón de Solape Deseada y Área de Solape y a su vez dice que determinados conceptos dependen del criterio del diseñador y tienen una gran importancia en la correcta estimación del modelo.

Tal y como se ha comentado anteriormente el solapamiento de las funciones de pertenencia depende en muchas ocasiones del problema tratado. Para este caso no son aplicables muchos de los planteamientos realizados por Vélez [84] y otros autores y se ha tenido que establecer una metodología experta específica para este problema particular.

Por ejemplo, Vélez [84] citando a Marsh [85] hace mención a cuatro reglas que deben cumplir las funciones de pertenencia para considerar que su distribución en el universo de discurso es correcta:

1. “Cada punto del universo de discurso debe pertenecer al dominio de al menos una FP, adicionalmente, cada punto no debería pertenecer al dominio de más de dos FP”.

Para el modelo propuesto en esta tesis se cumple.

2. “No deben existir dos FP con el mismo punto de máximo grado de pertenencia”.

Para el modelo propuesto se cumple.

3. “Cuando se solapen dos FP, la suma de los grados de pertenencia para cualquier punto en el solape debe ser menor o igual a 1”.

Para el modelo propuesto no se cumple.

4. El solape no debe cruzar el punto de máximo grado de pertenencia de cualquiera de las FP.

Para el modelo propuesto no se cumple (existe coincidencia).

Además para el modelo propuesto se cumple que $GPS < 1$.

Los coeficientes calculados sirven para:

1. Valorar si determinados solapes son excesivos comparándolos con el resto. Un excesivo solape pueda hacer que el sistema pierda sensibilidad en la respuesta y uno insuficiente puede hacer que el sistema no funcione correctamente.
2. Ayudar a detectar disfunciones en el particionado experto y en la definición de las funciones de pertenencia, lo que puede determinar una revisión del conocimiento experto en AHP.
3. Comparar resultados al aplicar la metodología desarrollada en esta tesis para el caso de otros Incidentes No Rutinarios (INR) como es el caso de los incendios forestales. El Plan Especial de Protección Civil y Atención de Emergencia por Incendios Forestales de la Comunidad Autónoma de Canarias (INFOCA), que también cuenta con la variable declaración (prealerta, alerta o alerta máxima), es una tipología de incidente susceptible de aplicar el modelo híbrido desarrollado.

5.1.3.2.2. Rangos y valores lingüísticos de la variable de entrada PRECIPITACIÓN ACUMULADA

VARIABLE DE ENTRADA: PRECIPITACIÓN ACUMULADA (en 12 horas)			
RANGO	FUNCIÓN DE PERTENENCIA	VALOR LINGÜÍSTICO	OBSERVACIONES
0 - 40	(-10, -10, 0.26, 0.50)	N	Nada precipitación
40 - 60	(0.38, 0.66, 0.91)	P	Poca precipitación
60 - 80	(0.79, 1.02, 1.24)	M	Media precipitación
80 - 100	(0.96, 1.63, 2.30)	MA	Media alta precipitación
100 - 120	(2.01, 2.61, 3.21)	A	Alta precipitación
120 - 180	(2.76, 4.12, 5.48)	MAA	Muy alta precipitación
> 180	(5.01, 6.35, 10, 10)	ALT	Altísima precipitación

Tabla 46: Variable de entrada PRECIPITACIÓN ACUMULADA, con prioridades globales (ver tabla 37) como valores centrales de las funciones de pertenencia.

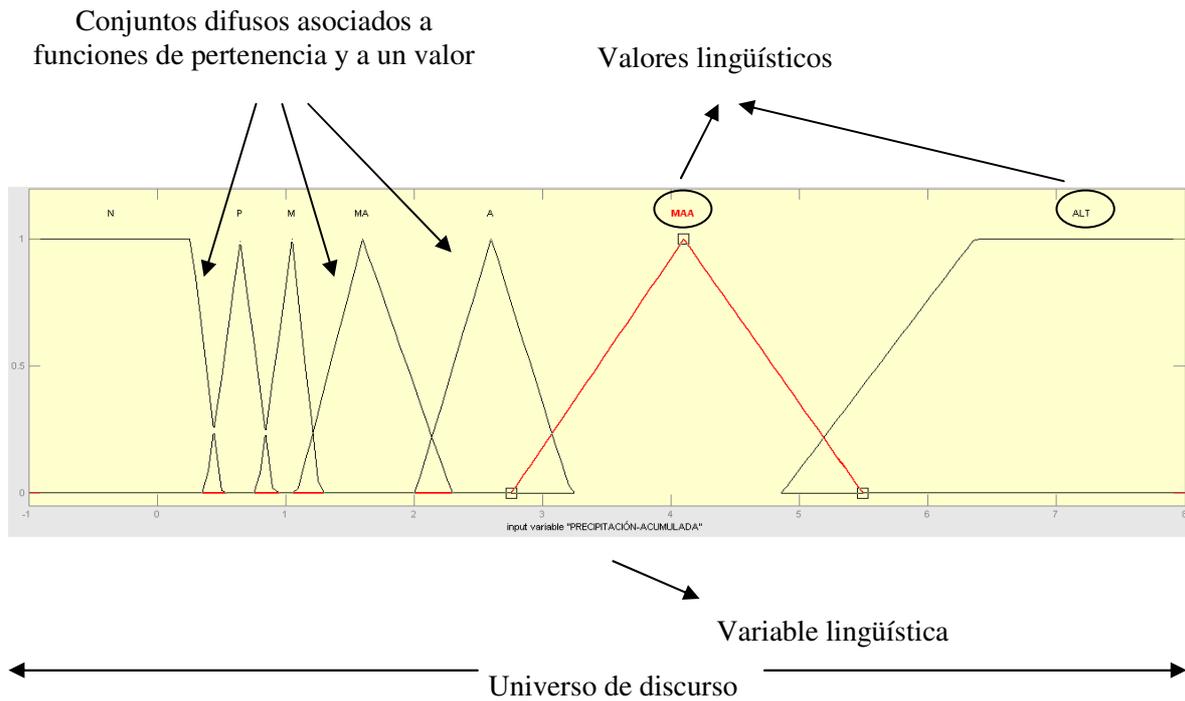


Figura 18: Variable de entrada, PRECIPITACIÓN ACUMULADA, con los conjuntos difusos asociados (MATLAB.)

A medida que la precipitación acumulada va aumentando, el grado de pertenencia a una función, por ejemplo MAA, irá disminuyendo y aumentando el grado de pertenencia a ALT, proporcionando una transición gradual de estados.

5.1.3.2.3. Rangos y valores lingüísticos de la variable de entrada ZONA

Aplicando el mismo procedimiento para la variable ZONA se obtiene la siguiente tabla:

	1ª JERARQUÍA (variables primarias)		2ª JERARQUÍA (prioridades locales)	Prioridades globales	FUNCIÓN DE PERTENENCIA
ZONA	0,0883	Las Palmas	0,6667	0,0589	(3.67, 5.89, 10, 10)
		S/C de Tenerife	0,3333	0,0294	(-10 -10 2.94 5.36)

Tabla 47: Variable de entrada ZONA, con prioridades globales (ver tabla 37) como valores centrales de las funciones de pertenencia.

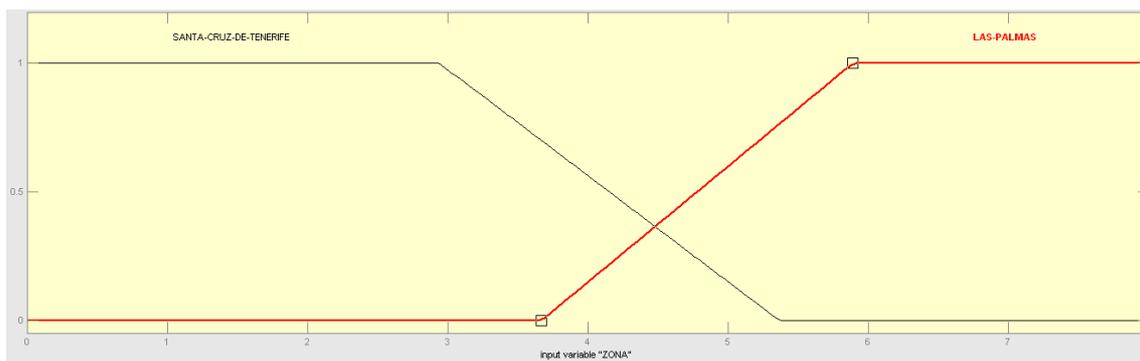


Figura 19: Variable de entrada, ZONA, con los conjuntos difusos asociados (MATLAB).

5.1.3.2.4. Rangos y valores lingüísticos de la variable de entrada LLAMADAS

Con el FMA en curso, comienzan a aparecer DATOS REALES. Estos nuevos datos empiezan a alimentar el sistema y pueden ocasionar un cambio de situación (alerta a alerta máxima). La entrada en juego de esta variable, con un peso del 74.78% sobre el resto de las variables primarias (ZONA y PRECIPITACIÓN), es determinante para un cambio de situación, en su salida, del sistema.

	1ª JERARQUÍA (variables primarias)		2ª JERARQUÍA (prioridades locales)	Prioridades globales	FUNCIÓN DE PERTENENCIA
LLAMADAS	0,7478	Incremento 0-50%	0,0618	0,0462	(-10 -10 4.62 15)
		Incremento 50-100%	0,2648	0,1980	(10 19.80 44)
		Incremento >100%	0,6734	0,5036	(40, 50.36, 70, 70)

Tabla 48: Variable de entrada LLAMADAS, con prioridades globales como valores centrales de las funciones de pertenencia.



Figura 20: Variable de entrada, LLAMADAS, con los conjuntos difusos asociados (MATLAB).

5.1.3.2.5. Rangos y valores lingüísticos de la variable de salida DECLARACIÓN

La variable de salida determina una serie de acciones a tomar que vienen recogidas en el PEFMA [1].

Con cada función de pertenencia se han cubierto los intervalos que comprenden los nuevos umbrales para los diferentes códigos de colores (tabla 40). Se solapan las funciones para que el paso de una situación a otra sea gradual.

FUNCIÓN DE PERTENENCIA	VALOR LINGÜÍSTICO	TAREAS A REALIZAR POR LOS SERVICIOS DE EMERGENCIAS
(-2, -2 0.03, 0.04)	NADA	Ninguna
(0.03, 0.05, 0.08)	PREALERTA	Se declara prealerta funciones según PEFMA
(0.07, 0.13, 0.19)	ALERTA	Se declara alerta funciones según PEFMA
(0.17, 0.19, 2, 2)	ALERTA MÁXIMA	Se declara alerta máxima funciones según PEFMA

Tabla 49: Variable de salida DECLARACIÓN. Los valores centrales de las funciones de pertenencia se deducen de la tabla 40.

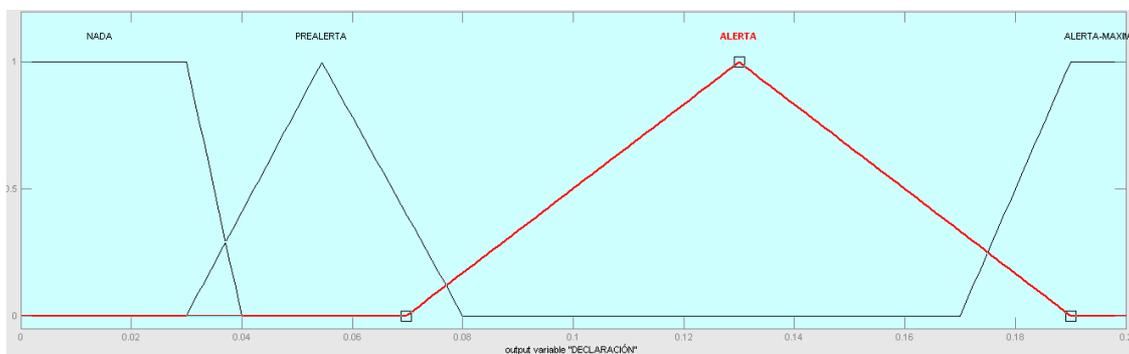


Figura 21: Variable de salida, DECLARACIÓN, con los conjuntos difusos asociados (MATLAB).

Antes, en una declaración de alerta no existían diferencias, es decir, todas eran iguales en la teoría. En realidad, algunas pasaban desapercibidas y otras eran demasiado virulentas y con consecuencias catastróficas. Se reforzaba el personal del CECOES 1-1-2 en todos los casos y se tomaban todas las medidas necesarias, lo que implicaba un gasto innecesario.

Ahora, analizando la fig. 5.9, una alerta con un mayor grado de pertenencia al conjunto no determina las mismas acciones que una con un menor grado de pertenencia. Por ejemplo, en las alertas con grados de pertenencia pequeños ya no se reforzaría el CECOES 1-1-2, antes sí.

Lo anterior permite que el CECOES 1-1-2 se adapte y ajuste mejor a las diferentes situaciones meteorológicas.

5.2. VALIDACIÓN DEL SISTEMA

Para comprobar y ajustar el modelo propuesto se seleccionan tres escenarios de FMA en un periodo temporal cercano. Dos con consecuencias de especial relevancia y con importantes repercusiones sobre la economía y los bienes de las personas (1 y 3) y otro sin importantes repercusiones (2) [76] [77]:

1. Del 29 de enero al 2 de febrero de 2010: FMA lluvia.
2. Del 15 al 18 de diciembre de 2009: FMA lluvia y vientos.
3. Del 29 al 31 de enero de 2011: FMA lluvia y fenómenos localmente tormentosos.

Los datos obtenidos se estudian (ver anexo II) y se realizan simulaciones.

Los modelos, el actual y el propuesto, se comparan con dos estadísticos: el error cuadrático medio normalizado (ECMN) y el sesgo fraccional (SF), utilizados por Talavera y otros en "Application of Fuzzy Logic to estimate the intensity of thermal radiation in hydrocarbon fires" [53], Rew y otros en "Modelling of thermal radiation from external hydrocarbon pool fires" [54] y Muñoz y otros en "Analysis of the geometric and radioactive characteristics of hydrocarbon pool fire" [55].

Finalmente se aplica el "Test de Wilcoxon" para comparar el modelo actual y el propuesto con la realidad ocurrida.

5.2.1. Valores del modelo actual.

Desde final de los años 90, la toma de decisiones ante un FMA en Canarias ha seguido las siguientes fases:

1. La información facilitada por la AEMET ante la detección de un FMA, recibida en el CECOES 1-1-2, se pone en conocimiento de la Dirección General de Seguridad y Emergencias del Gobierno de Canarias (DGSE), como órgano competente en las declaraciones de prealerta, alerta o alerta máxima.
2. En base al análisis de la información recibida y en aplicación al Plan Específico de Emergencias de Canarias por Riesgos de Fenómenos Meteorológicos Adversos (PEFMA) [1], la DGSE realiza la declaración de prealerta, alerta o alerta máxima. En el tratamiento de la información influye la cantidad recibida, como ha sido transmitida a través de los diferentes canales y si ha sido influenciada en el proceso, la experiencia previa de los decisores, el tiempo disponible para tomar la decisión, etc.
3. La declaración es notificada al CECOES 1-1-2 que realiza los comunicados a las administraciones, organismos, servicios operativos y empresas involucradas en la operatividad del PEFMA, además de los avisos a la población en caso necesario. Cuando se recibe información adicional o datos reales, cuando el FMA está en curso, puede cambiar la declaración y se repite el proceso desde la fase 1.

Del funcionamiento del modelo actual se tienen las diferentes declaraciones realizadas para cada uno de los escenarios de FMA por parte de la DGSE. Los valores del modelo se extraen observando qué se declaró y se busca en la tabla 49 el valor de x en el que y alcanza 1, es decir, el mayor grado de pertenencia.

Por ejemplo, si se declaró una alerta se asigna según la tabla 49 el valor 0,130.

5.2.2. Valores observados (la realidad ocurrida).

Antes de que empiece a llover se optará por usar la predicción meteorológica, de tal forma que si la AEMET emite un aviso naranja se traslada a una ALERTA, un rojo a ALERTA MÁXIMA y un amarillo a una PREALERTA eligiendo el valor de la tabla 49.

Cuando el FMA está en curso, para valorar el observado se utilizan todos los datos recopilados de las diferentes fuentes [76] [77] y con la ayuda del panel de expertos se determina si realmente es una PREALERTA, ALERTA, etc. Si el panel de expertos determinan que corresponde a una ALERTA se utilizará el mismo procedimiento y se pondrá el valor de x en el que y alcanza 1 en la tabla 49.

5.2.3. Valores del modelo propuesto.

Los valores del modelo propuesto se extraen de las simulaciones realizadas mediante MATLAB con todos los datos introducidos del nuevo sistema (variables, reglas, etc.).

5.2.4. Error cuadrático medio normalizado (ECMN) y sesgo fraccional (SF)

Se utilizan los valores de salida de ambos modelos para compararlos con los observados (la realidad ocurrida) y mediante el cálculo del ECMN se mide la precisión del modelo propuesto frente al actual.

Mediante el cálculo del SF se observa la tendencia del modelo a sobreestimar o subestimar sobre la realidad ocurrida.

Dados n valores observados (X_0) y los correspondiente previstos (X_p) se tienen los siguientes coeficientes:

$$\text{ECMN} = \frac{1}{n} \sum_1^n \frac{(X_0 - X_p)^2}{X_0 X_p}$$

$$\text{SF} = \frac{2}{n} \sum_1^n \frac{(X_0 - X_p)}{(X_0 + X_p)}$$

FMA		Valor observado (x_0)	Valor previsto (x_p)	
			Modelo actual	Modelo propuesto
CON LA PREDICCIÓN METEOROLÓGICA (acumulado de 120 mm)				
1	Islas Occidentales	ALERTA	ALERTA	ALERTA
		0,130	0,130	0,130
	Islas Orientales	ALERTA MÁXIMA	ALERTA	ALERTA MÁXIMA
		0,190	0,130	0,187
CON EL FMA EN CURSO (con datos reales de llamadas o demandas >100%)				
1	Islas Occidentales	ALERTA MÁXIMA	ALERTA	ALERTA MÁXIMA
		0,190	0,130	0,188
	Islas Orientales	ALERTA MÁXIMA	ALERTA	ALERTA MÁXIMA
		0,190	0,130	0,188
CON LA PREDICCIÓN METEOROLÓGICA (acumulado de 90 mm)				
2	Islas Occidentales	PREALERTA	ALERTA	PREALERTA
		0,050	0,130	0,050
	Islas Orientales	ALERTA	ALERTA	ALERTA
		0,130	0,130	0,130
CON EL FMA EN CURSO (con datos reales de llamadas o demandas entre 0-50%)				
2	Islas Occidentales	PREALERTA	ALERTA	PREALERTA
		0,050	0,130	0,055
	Islas Orientales	ALERTA	ALERTA	ALERTA
		0,130	0,130	0,130
CON LA PREDICCIÓN METEOROLÓGICA (acumulado de 60 mm)				
3	Islas Occidentales	PREALERTA	ALERTA	PREALERTA
		0,050	0,130	0,050
	Islas Orientales	PREALERTA	PREALERTA	PREALERTA
		0,050	0,050	0,050
CON EL FMA EN CURSO (con datos reales de llamadas o demandas entre 50-100%)				
3	Islas Occidentales	ALERTA	ALERTA	ALERTA
		0,130	0,130	0,130
	Islas Orientales	ALERTA MÁXIMA	ALERTA	ALERTA MÁXIMA
		0,190	0,130	0,190

Tabla 50: Valores de salidas de ambos modelos (DECLARACIÓN) y valores observados para los escenarios de FMA 1, 2 y 3.

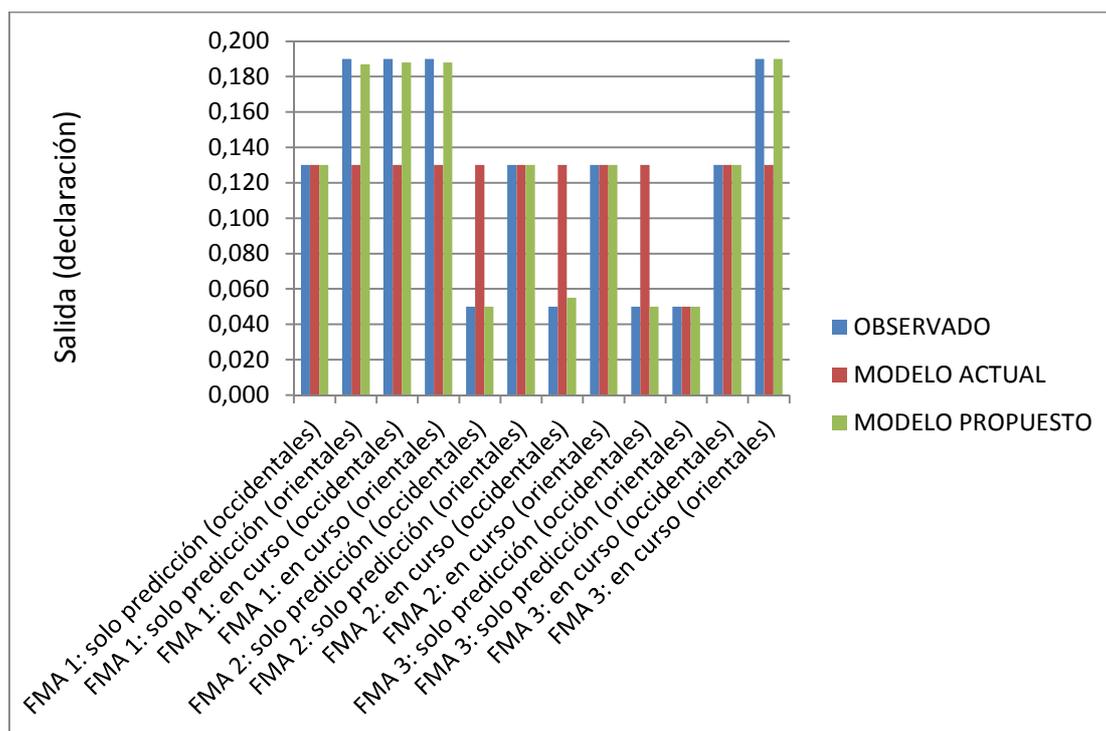


Figura 22: Valores de salidas de ambos modelos (DECLARACIÓN) y valores observados para los escenarios de FMA 1, 2 y 3.

ECMN		SF	
Modelo actual	Modelo propuesto	Modelo actual	Modelo propuesto
0,29474	0,00080	-0,09722	-0,00485

Tabla 51: Valores ECMN y SF para el modelo actual y el propuesto.

Cuanto menor es el ECMN el modelo es más preciso, ya que se acerca más a la realidad ocurrida. Si el ECMN aumenta la imprecisión del modelo aumenta.

Se concluye que el modelo propuesto es más preciso y se asemeja más a la realidad ocurrida que el modelo actual.

Los valores negativos de SF proporcionan información sobre la tendencia del modelo a sobreestimar, mientras que los valores positivos indican la tendencia a subestimar. Los valores obtenidos no son significativos.

Como conclusión se tiene que el modelo propuesto tiene una ligera tendencia a sobreestimar, menor que el modelo actual, lo que es considerado adecuado en modelos de este tipo en los que siempre debe existir un pequeño margen de seguridad.

Ajustar el modelo en mayor medida, en márgenes demasiado cercanos a subestimar con respecto a la realidad, se corre el riesgo de tomar decisiones erróneas, algo que no se debe permitir en este ámbito de trabajo.

5.2.5. Prueba de Kolmogorov-Smirnov (KS)

Antes de aplicar el “Test de Wilcoxon” para comparar el modelo actual y el propuesto con la realidad ocurrida, y dado que se trata de un test no paramétrico, es necesario comprobar que los datos no siguen una distribución normal.

A la distribución normal se la conoce con el nombre de campana de Gauss, ya que al representar su función de probabilidad tiene forma de campana

La prueba de Kolmogorov-Smirnov se basa en la idea de comparar la función de la distribución acumulada de los datos disponibles con los de una distribución normal, calculando la máxima distancia entre ambas curvas [95].

En los test de hipótesis, como el de Wilcoxon, la hipótesis nula se rechaza cuando el valor del estadístico supera un cierto valor crítico. En los softwares estadísticos, como el SPSS o el R Project, está programado dicho procedimiento facilitando el valor del test así como el correspondiente p-valor.

Se utiliza un nivel de significancia del 5%

Para el caso que se está tratando se utiliza el paquete estadístico SPSS siendo:

- La hipótesis nula (H_0): el conjunto de datos sigue una distribución normal.
- La hipótesis alternativa (H_1): el conjunto de datos no sigue una distribución normal.

Aprovechando los resultados del paquete estadístico SPSS se utiliza el criterio de significancia (p-valor):

- Si $p\text{-valor} < 0.05$ entonces se rechaza la hipótesis nula.
- Si $p\text{-valor} > 0.05$ entonces no hay elementos suficientes en la muestra para rechazar la hipótesis nula.

Los valores de significancia obtenidos para los tres grupos de datos son menores que 0.05 por lo tanto se rechaza la hipótesis nula y se asume que los datos no siguen una distribución normal.

Como ejemplo el nivel de significancia y gráfica obtenida con el SPSS para el modelo actual:

Nivel de significancia: 0.002

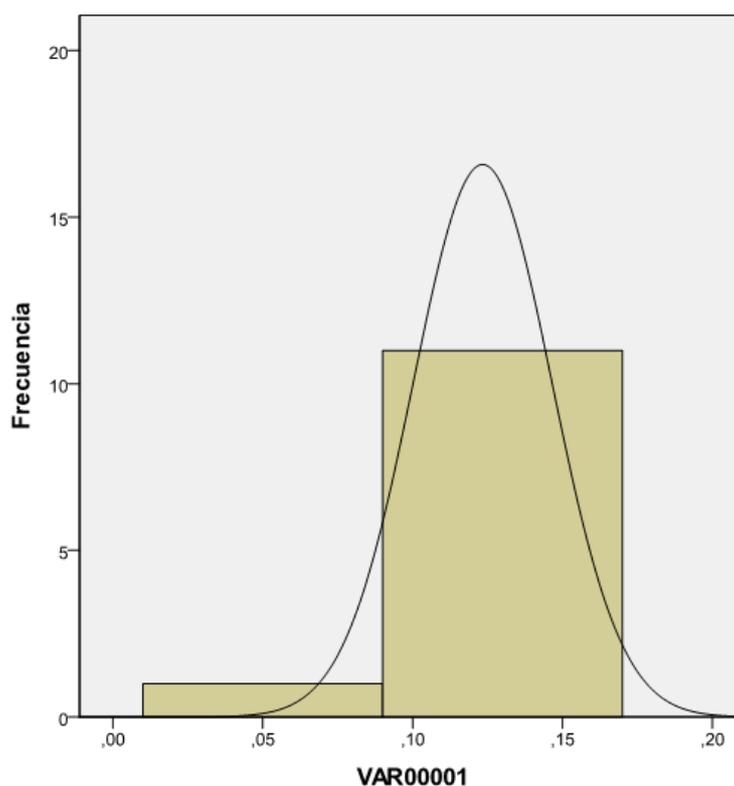


Figura 23: Nivel de significancia y gráfica obtenida con el SPSS para el modelo actual.

MODELO	SIGNIFICANCIA	DECISIÓN	DISTRIBUCIÓN
Modelo actual.	0.002	Se rechaza la hipótesis nula.	No normal, se puede aplicar Wilcoxon.
Observado.	0.012	Se rechaza la hipótesis nula.	No normal, se puede aplicar Wilcoxon.
Modelo propuesto.	0.020	Se rechaza la hipótesis nula.	No normal, se puede aplicar Wilcoxon.

Tabla 52: Valores obtenidos en el SPSS para la significancia en los diferentes modelos.

5.2.6. Test de Wilcoxon

La estadística no paramétrica es una parte de la estadística que se recomienda cuando no se puede asumir que los datos se ajustan a una distribución conocida, consideración que se va a hacer extensiva a los tres escenarios estudiados.

El “Test de Wilcoxon” o “Prueba de Rango con Signo de Wilcoxon”, que debe su nombre a Frank Wilcoxon [56], es una prueba no paramétrica que se usa para comparar la mediana de dos muestras que se supone a priori tienen relación y determinar si existen diferencias. Se utiliza como opción a la prueba T de Student para el caso en el que no se puede suponer la normalidad de las muestras.

Se aplica Wilcoxon para demostrar que el modelo propuesto es más preciso y se asemeja más a la realidad ocurrida que el modelo actual.

El test permite comparar los datos obtenidos de los modelos actual y propuesto con los datos de la realidad ocurrida.

El método se aplica de la siguiente forma:

Primero se establece la hipótesis nula (H_0):

Si las diferencias proceden de una distribución simétrica en torno a cero los valores de W^+ y W^- son similares o cuanto más próximos son los valores de W^+ y W^- , el modelo comparado se acerca más a la realidad ocurrida.

Seguidamente se establece la hipótesis alternativa (H_a):

Si las diferencias no proceden de una distribución simétrica en torno a cero, los valores de W^+ y W^- no son similares o cuanto más alejados son los valores de W^+ y W^- , el modelo comparado se aleja más de la realidad ocurrida (ver 4.4.2).

Pares de medidas (MODELO ACTUAL, OBSERVADO)		Pares de medidas (MODELO PROPUESTO, OBSERVADO)	
MODELO ACTUAL (X_i)	OBSERVADO (Y_i)	MODELO PROPUESTO (X_i)	OBSERVADO (Y_i)
0,130	0,130	0,130	0,130
0,130	0,190	0,187	0,190
0,130	0,190	0,188	0,190
0,130	0,190	0,188	0,190
0,130	0,050	0,050	0,050
0,130	0,130	0,130	0,130
0,130	0,050	0,055	0,050
0,130	0,130	0,130	0,130
0,130	0,050	0,050	0,050
0,050	0,050	0,050	0,050
0,130	0,130	0,130	0,130
0,130	0,190	0,190	0,190

Tabla 53: Valores obtenidos de los diferentes modelos.

Con el modelo actual se tienen n pares denominados (X_i, Y_i) . Para verificar la hipótesis nula primero se calculan las diferencias y se eliminan las nulas. Seguidamente se ordenan las diferencias en valores absolutos $|Z_1|, \dots, |Z_n|$ y se asigna un rango R_i . Si alguno de los valores se repite, se calcula el rango medio.

MODELO ACTUAL (X_i)	OBSERVADO (Y_i)	DIFERENCIAS (Z_i)		DIFERENCIAS (ordenadas por $ Z_i $)	Orden/Rango R_i	Corrección de valores repetidos
0,130	0,130	Z_1	0,000	0,000	-	-
0,130	0,190	Z_2	-0,060	0,000	-	-
0,130	0,190	Z_3	-0,060	0,000	-	-
0,130	0,190	Z_4	-0,060	0,000	-	-
0,130	0,050	Z_5	0,080	0,000	-	-
0,130	0,130	Z_6	0,000	0,060	1	2,500
0,130	0,050	Z_7	0,080	0,060	2	2,500
0,130	0,130	Z_8	0,000	0,060	3	2,500
0,130	0,050	Z_9	0,080	0,060	4	2,500
0,050	0,050	Z_{10}	0,000	0,080	5	6,000
0,130	0,130	Z_{11}	0,000	0,080	6	6,000
0,130	0,190	Z_{12}	-0,060	0,080	7	6,000

Tabla 54: Cálculo de valores para el modelo actual (Wilcoxon).

En rojo los valores negativos.

Seguidamente se suman:

- Los rangos de las diferencias positivas, es decir, la suma de los rangos correspondientes a los valores positivos de Z_i .

$$W^+ = \sum_{Z_i > 0}^{Z_n} R_i = 6 + 6 + 6 = 18$$

- Los rangos de las diferencias negativas, es decir, la suma de los rangos correspondientes a los valores negativos de Z_i .

$$W^- = \sum_{Z_i < 0}^{Z_n} R_i = 2,5 + 2,5 + 2,5 + 2,5 = 10$$

Dado que los valores de W^+ y W^- no son similares se rechazó la hipótesis nula o no se puede asegurar que el modelo actual se comporte igual o similar a la realidad ocurrida.

A continuación se repite el test con el modelo propuesto:

MODELO PROPUESTO (X_i)	OBSERVADO (Y_i)	DIFERENCIAS (Z_i)		DIFERENCIAS (ordenadas por $ Z_i $)	Orden/Rango R_i	Corrección de valores repetidos
0,130	0,130	Z_1	0,000	0,000	-	-
0,187	0,190	Z_2	-0,003	0,000	-	-
0,188	0,190	Z_3	-0,002	0,000	-	-
0,188	0,190	Z_4	-0,002	0,000	-	-
0,050	0,050	Z_5	0,000	0,000	-	-
0,130	0,130	Z_6	0,000	0,000	-	-
0,055	0,050	Z_7	0,005	0,000	-	-
0,130	0,130	Z_8	0,000	0,000	-	-
0,050	0,050	Z_9	0,000	0,002	1	1,500
0,050	0,050	Z_{10}	0,000	0,002	2	1,500
0,130	0,130	Z_{11}	0,000	0,003	3	3,000
0,190	0,190	Z_{12}	0,000	0,005	4	4,000

Tabla 55: Cálculo de valores para el modelo propuesto (Wilcoxon).

En rojo los valores negativos.

Sumas:

- Los rangos de las diferencias positivas, es decir, la suma de los rangos correspondientes a los valores positivos de Z_i .

$$W^+ = \sum_{Z_i > 0}^{Z_n} R_i = 4$$

- Los rangos de las diferencias negativas, es decir, la suma de los rangos correspondientes a los valores negativos de Z_i .

$$W^- = \sum_{Z_i < 0}^{Z_n} R_i = 1,5 + 1,5 + 3 = 6$$

Dado que los valores de W^+ y W^- son mucho más cercanos que para el caso del modelo actual, se puede concluir que el modelo propuesto se acerca más a la realidad ocurrida que el modelo actual.

MODELO	W^+	W^-	DIFERENCIA EN VALOR ABSOLUTO
PROPUESTO	4	6	2
ACTUAL	18	10	8

Tabla 56: Valores de W^+ y W^-

CAPÍTULO 6
RESULTADOS,
CONCLUSIONES
Y
LÍNEAS FUTURAS

6. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

6.1. RESULTADOS

Los resultados reales alcanzados con respecto a los objetivos planteados han sido:

1. Como consecuencia de una reducción notable del tiempo de procesamiento de la información, el sistema mejoraba la respuesta a la hora de realizar las declaraciones de prealertas, alertas y alertas máximas, ya que se automatizaba todo el proceso que se realizaba antes manualmente. Además, se disminuía el tiempo al realizar los avisos de autoprotección y prevención a la población.
2. En los tres escenarios de FMA estudiados la variable declaración del modelo propuesto coincidió con la observada. Por lo tanto, tras los excelentes resultados de las simulaciones, ya que se asemejaron a la realidad ocurrida, se realizó la propuesta oficial de modificaciones de METEOALERTA [2], actualmente modificado y publicado (Gobierno de España. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Agencia Estatal de Meteorología. “Plan Nacional de Predicción y Vigilancia de Fenómenos Meteorológicos Adversos, METEOALERTA [2]”. Versión: 5 Fecha: 9-7-2013). Las modificaciones para Canarias fueron en cuanto a:
 - Los umbrales establecidos en METEOALERTA [2]: los valores umbrales son aquellos valores de intensidad del fenómeno a partir de los cuales se considera que existe la posibilidad de que se produzcan daños a las personas y los bienes materiales. Canarias toma como referencia para las actuaciones previstas en el ámbito del Plan Autonómico (PEFMA) la información meteorológica suministrada por AEMET, de acuerdo con la versión más reciente de METEOALERTA [2] y, sin perjuicio, de que las autoridades competentes de Protección Civil puedan recabar información adicional de otras fuentes. Se cambiaron los umbrales establecidos para la precipitación acumulada en 12 horas (litros de precipitación o lluvia por m² en 12 horas) por el cual la AEMET genera un aviso.
 - Las zonas de predicción meteorológica para Canarias (pasan de 17 zonas a 12) de METEOALERTA [2] y PEFMA [1], ya modificadas y publicadas. Se observa que para el conjunto de expertos consultados, determinadas zonas de predicción meteorológica tienen el mismo peso o influyen de igual manera. Por

ejemplo, "Costa Norte de Gran Canaria" y "Medianías Norte de Gran Canaria" tienen el mismo peso para el conjunto de expertos al aplicar AHP, por lo que se propone la unificación de determinadas zonas en una sola simplificando así el sistema.

	3ª JERARQUÍA (prioridades locales)	Prioridades globales		4ª JERARQUÍA (prioridades locales)	Prioridades globales
Gran Canaria	0,6000	0,0353	Costa Norte de Gran Canaria	0,3716	0,0131
			Medianías Norte de Gran Canaria	0,3716	0,0131
			Cumbres de Gran Canaria	0,0917	0,0032
			Este, Sur y Oeste de Gran Canaria	0,1651	0,0058
Lanzarote	0,2000	0,0118	Lanzarote	1,0000	0,0118
Fuerteventura	0,2000	0,0118	Fuerteventura	1,0000	0,0118
La Palma	0,0917	0,0027	Norte de La Palma	0,3716	0,0010
			Cumbres de La Palma	0,3716	0,0010
			Este de La Palma	0,0917	0,0002
			Oeste de La Palma	0,1651	0,0004
Gomera	0,2064	0,0061	Norte de La Gomera	0,5000	0,0030
			Sur de La Gomera	0,5000	0,0030
El Hierro	0,2064	0,0061	Noreste de El Hierro	0,5000	0,0030
			Suroeste de El Hierro	0,5000	0,0030
Tenerife	0,4954	0,0146	Consta Norte de Tenerife	0,2000	0,0029
			La Orotava y Vilaflor	0,2000	0,0029
			Este, Sur y Oeste de Tenerife	0,6000	0,0087

Tabla 57: Zonas con ponderaciones tras aplicar AHP. Extracto de la tabla 37.

3. Además de lo anterior, también se realizó la propuesta de modificación del PEFMA (Gobierno de Canarias. “Plan Específico de Protección Civil y Atención de

Emergencias de la Comunidad Autónoma de Canarias por riesgos de Fenómenos Meteorológicos Adversos, PEFMA [1]”. Aprobado abril 2014.)



GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO



Modificaciones propuestas por CECOES-112 al Plan Meteoalerta Abril 2011

- 1) Umbrales.
 - Precipitaciones en 12 horas:
 - Provincia de Las Palmas: 40/80/120
 - Provincia de Santa Cruz de Tenerife (quedaría igual): 60/100/180

- 2) Zonificación:
 - Eliminar la palabra costa en la zona “Costa Norte de Gran Canaria” y “Costa Norte de Tenerife”
 - El Hierro se unificaría en una sola zona.
 - La Gomera se unificaría en una sola zona.
 - En La Palma desaparecería la zona “Norte de La Palma” quedando sólo tres zonas.
 - Barlovento pasaría a la zona “Este de La Palma”
 - Garafia pasaría a la zona “Oeste de La Palma”.
 - En la isla de Tenerife la zona “La Orotava y Vilaflor” desaparecería:
 - La Orotava pasaría a formar parte de la zona “Norte de Tenerife”
 - Vilaflor a la zona “Este, Sur y Oeste de Tenerife”.

También en Tenerife:

 - El municipio de Santa Cruz también se integraría en la zona “Este, Sur y Oeste de Tenerife”.
 - La Laguna quedaría en la zona “Norte de Tenerife”
 - En la isla de Gran Canaria la zona “Medianías norte de Gran Canaria” desaparecería y pasaría a formar parte de la zona “Norte de Gran Canaria”.
 - San Mateo pasaría a formar parte de “Cumbres de Gran Canaria”.
 - Valsequillo se integraría en la zona “Este, Sur y Oeste de Gran Canaria”

Figura 24: Modificaciones propuestas por el CECOES 1-1-2 al Plan Nacional METEOALERTA.

UMBRALES Y NIVELES DE AVISO PARA LAS VARIABLES: TEMPERATURAS MÁXIMAS Y MÍNIMAS, VIENTOS, PRECIPITACIONES EN 12 H Y 1 H Y NEVADAS

A continuación se muestra la tabla de umbrales del Plan Nacional METEOALERTA que afectan a las islas Canarias con las modificaciones realizadas o propuestas.

umbrales		temperaturas máximas			temperaturas mínimas			vientos			precipitación 12h			precipitación 1h			nevadas en cm			
CODIGO	NOMBRE DE LA ZONA	PROVINCIA	amlo	naranja	rojo	amlo	naranja	rojo	amlo	naranja	rojo	amlo	naranja	rojo	amlo	naranja	rojo	amlo	naranja	rojo
65900	Norte de Gran Canaria	Las Palmas	34	37	40	-1	-4	-8	70	90	130	40	80	120	15	30	60	2	5	20
65900	Cumbres de Gran Canaria	Las Palmas	34	37	40	-1	-4	-8	70	90	130	40	80	120	15	30	60	2	5	20
65900	Este, sur y oeste de Gran Canaria	Las Palmas	34	37	40	-1	-4	-8	70	90	130	40	80	120	15	30	60	2	5	20
65910	Lanzarote	Las Palmas	34	37	40	-1	-4	-8	70	90	130	40	80	120	15	30	60	2	5	20
65920	Fuerteventura	Las Palmas	34	37	40	-1	-4	-8	70	90	130	40	80	120	15	30	60	2	5	20
65930	Cumbres de la Palma	Sta Cruz de Tenerife	34	37	40	-1	-4	-8	70	90	130	60	100	180	15	30	60	2	5	20
65930	Este de la Palma	Sta Cruz de Tenerife	34	37	40	-1	-4	-8	70	90	130	60	100	180	15	30	60	2	5	20
65930	Oeste de la Palma	Sta Cruz de Tenerife	34	37	40	-1	-4	-8	70	90	130	60	100	180	15	30	60	2	5	20
65940	La Gomera	Sta Cruz de Tenerife	34	37	40	-1	-4	-8	70	90	130	60	100	180	15	30	60	2	5	20
65950	El Hierro	Sta Cruz de Tenerife	34	37	40	-1	-4	-8	70	90	130	60	100	180	15	30	60	2	5	20
65960	Norte de Tenerife	Sta Cruz de Tenerife	34	37	40	-1	-4	-8	70	90	130	60	100	180	15	30	60	2	5	20
65960	Este, sur y oeste de Tenerife	Sta Cruz de Tenerife	34	37	40	-1	-4	-8	70	90	130	60	100	180	15	30	60	2	5	20

Tabla 58: Tabla umbrales y niveles de aviso AEMET con modificaciones (fuente METEOALERTA [2])

6.2. CONCLUSIONES

La toma de decisiones, se da por igual tanto en el ámbito personal como en el profesional. Responsables de empresas y organizaciones tienen que decidir constantemente durante el transcurso de su actividad profesional.

Existe una extensa bibliografía sobre la aplicación de sistemas expertos basados en reglas, métodos de análisis de decisión multicriterio discreta y metodologías de inteligencia artificial, como por ejemplo la Lógica Difusa, en multitud de campos profesionales. Sin embargo, en el sector de la Seguridad y Emergencias y para el tema que se ha tratado se reduce notablemente (ver [45] [46] [47] en tabla 6).

El objetivo de este trabajo ha sido investigar el método más adecuado para desarrollar un sistema que permitiera seleccionar la mejor alternativa ante el riesgo por FMA, es decir, la declaración (prealerta, alerta o alerta máxima) que mejor se corresponda con la situación que se esté viviendo.

Con métodos analíticos para la toma de decisiones multicriterio se ha trabajado con criterios tangibles e intangibles, objetivos y subjetivos, además de cuantitativos y cualitativos.

La solución elegida que mejor se adapta al problema planteado es la de establecer un protocolo que permita la selección de forma dinámica, es decir, que el sistema se actualice con los nuevos datos que surjan de la evolución del fenómeno meteorológico y de los daños que fuera causando a las personas y los bienes.

Por otro lado, el protocolo resultante debía permitir generar prioridades numéricas a partir de criterios y organizarlos en matrices que posibilitaran estructurar jerárquicamente el complejo problema de selección. Estas prioridades, al mismo tiempo, debían combinar decisiones de tipo técnico y decisiones estratégicas.

En resumen, el modelo de decisión propuesto utiliza:

- El Proceso Analítico Jerárquico (AHP) en general para extraer el conocimiento del conjunto de expertos y en particular para la evaluación de los criterios subjetivos con posibles contradicciones entre los decisores.

- La Lógica Difusa como motor de inferencia para utilizar la vaguedad y subjetividad de las variables del sistema.
- El sistema experto basado en reglas para integrarlo todo.

Como novedad aportada, se mejora el modelo actual utilizado, siendo dicha mejora exportable y aplicable, parcial o totalmente, a cualquier comunidad autónoma. Se combina la predicción meteorológica de la AEMET, el conocimiento de expertos locales, METEOALERTA y Planes de Protección Civil, destinados a proteger la vida y bienes de las personas en un entorno de incertidumbre, imprecisión, ambigüedad con datos erróneos o ausencia de estos.

Se combina Lógica Difusa con AHP, obteniéndose una respuesta precisa ante emergencias del tipo FMA.

6.3. LÍNEAS FUTURAS

En cuanto al futuro más inmediato se pretende:

- Aplicar la metodología desarrollada en esta tesis para el caso de incendios forestales. El Plan Especial de Protección Civil y Atención de Emergencia por Incendios Forestales de la Comunidad Autónoma de Canarias (INFOCA), que también cuenta con la variable declaración (prealerta, alerta o alerta máxima), es una tipología de incidente susceptible de aplicar el modelo híbrido desarrollado.
- Valorar el resto de “Planes de Protección Civil” de la Comunidad Autónoma Canaria por si fueran susceptibles de aplicar el modelo híbrido desarrollado o modificado.
- Utilizar otros métodos de decisión multicriterio (vistos en el capítulo 3) para adquisición del conocimiento y comparar resultados. De idéntica manera que en este trabajo se modifica la tradicional metodología AHP Fuzzy [11] para simplificar cálculos con los conjuntos difusos se plantea modificar la metodología TOPSIS Fuzzy. Primero se aplica TOPSIS y obteniéndose la base de conocimiento después se fusifica ese conocimiento para utilizarlo en el sistema experto basado en Lógica Difusa, para finalmente obtener la alternativa ideal (declaración: prealerta, alerta o alerta máxima).

- Utilizar métodos de decisión multicriterio, por ejemplo Ponderación Lineal (SCORING) [22], y observar cómo se comportan para la selección de expertos.

Además, con respecto a las declaraciones de prealerta, alerta o alerta máxima ante FMAs se plantea:

- Profundizar con mayor grado de detalle en las zonas de predicción meteorológica, dividiendo estas en subzonas catalogadas por el riesgo existente desde el punto de vista de Protección Civil.
- Adaptar y probar el sistema para fenómenos meteorológicos del tipo: Viento, Nieve, Temperatura Extrema Mínima, Temperatura Extrema Máxima, Tormentas, Temporales Costeros y Tormentas Tropicales.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Gobierno de Canarias. “Plan Específico de Protección Civil y Atención de Emergencias de la Comunidad Autónoma de Canarias por riesgos de Fenómenos Meteorológicos Adversos, PEFMA”. Aprobado diciembre 2006, modificado abril 2014 (Decreto 18/2014, de 20 de marzo).
- [2] Gobierno de España. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Agencia Estatal de Meteorología. “Plan Nacional de Predicción y Vigilancia de Fenómenos Meteorológicos Adversos, METEOALERTA”. Aprobado noviembre 2009 y julio de 2013.
- [3] Saaty TL. The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation. 2ª edición. New York: McGraw-Hill, 1988. 287 p. ISBN 0070543712 9780070543713.
- [4] Saaty TL. Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process. 2ª edición. Pittsburgh: RWS Publications, 2000. 478 p. ISBN: 1888603151, 9781888603156.
- [5] Saaty TL. Decision making for leaders: the analytic hierarchy process for decisions in a complex world. 3ª edición. Pittsburgh: RWS Publications, 1999. 343 p. ISBN: 0-9620317-8-X.
- [6] Saaty TL. What is the analytic hierarchy process? En: Greenberg HJ. Mathematical Models for Decision Support. 1ª edición. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1988. p. 109-121. ISBN: 978-3-642-83557-5.
- [7] Zadeh LA. Fuzzy sets and their applications to cognitive and decision processes. New York: Academic Press, 1975. 496 p. ISBN: 0127752609 9780127752600.
- [8] Zadeh LA. “Fuzzy sets”. Information and Control. 1965. Vol.8 p.338-353. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X).
- [9] Klir GJ, Yuan B. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic. Theory and Applications. 1ª edición. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1995. 574 p. ISBN: 0131011715 9780131011717.
- [10] Bonissone P P, Decker K S. Selecting Uncertainty Calculi and Granularity: An Experiment in Trading-Off Precision and Complexity. En: Kanal LN, Lemmer JF.

- Uncertainty in Artificial Intelligence. North-Holland: Elsevier Science Pub. Co., 1986. p. 217-247. ISBN: 9780444700582 0444700587
- [11] Jie Lu, Guangquan Zhang, Da Ruan, Fengjie Wu. Multi-Objective Group Decision Making. Methods, Software and Applications with Fuzzy Set Techniques. 1ª edición. London: Imperial College Press, 2007. 408 p. ISBN-13 978-1-86094-793-3. ISBN-10 1-86094-793-X
- [12] Romero C. Teoría de la decisión Multicriterio: Conceptos, técnicas y aplicaciones. Madrid: Alianza Editorial S.A, 1993. 195 p. ISBN: 842068144X, 9788420681443.
- [13] Romero C. Análisis de las Decisiones Multicriterio. 1ª edición. Madrid: Isdefe Ingeniería de Sistemas, 1996. 115 p. ISBN 84-89338-14-0
- [14] García Cascales M. Métodos para la comparación de alternativas mediante un Sistema de Ayuda a la Decisión (S.A.D.) y “Soft Computing”. Directora: Lamata Jiménez M. Universidad Politécnica de Cartagena, Departamento de Electrónica, Tecnología de Computadora y Proyectos, Cartagena, 2009.
- [15] Mellinas Fernández MJ. Análisis comparativo de Técnicas de Generación Eléctrica; AHP y Topsis Fuzzificado. Director: Cánovas Rodríguez FJ. Universidad Politécnica de Cartagena, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, 2012.
- [16] Maurtua Ollaguez DE. Capítulo II. La Toma de Decisiones. En: Criterios de Selección de Personal mediante el uso del proceso de análisis jerárquico. Aplicación en la selección de personal para la Empresa Exotic Foods S.A.C. Universidad Nacional Mayor de San Marcos de Lima-Perú, Facultad de ciencias Matemáticas, 2006.
- [17] León OG. Tomar decisiones difíciles. 2ª edición. Madrid: MacGraw Hill, 2001. 305 p. ISBN: 8448128664.
- [18] Ríos Insua S, Ríos Insua MJ. Procesos de Decisión Multicriterio. Madrid: EUDEMA S.A., 1989. 332 p. ISBN: 84-7754-037-3.
- [19] Berumen SA, Llamazares Redondo F. “La utilidad de los métodos de decisión multicriterio como el AHP en un entorno de competitividad creciente”. Cuadernos de Administración. Julio- diciembre de 2007. 20 (34) p.65-87.

-
- [20] Barba Romero S. “Panorámica actual de la decisión multicriterio discreta”. *Investigaciones Económicas*. 1987. Vol.XI nº 2 p.279-378
- [21] Zanzazi JL. “Anomalías y supervivencia en el método de toma de decisiones de Saaty”. *Problemas del Conocimiento en Ingeniería y Geología*. Agosto 2003. Vol.I p.148-170.
- [22] Roche H, Vejo C. “Análisis multicriterio en la toma de decisiones” [en línea]: Universidad de la República de Uruguay, 2005. Disponible en Web: <http://www.ccee.edu.uy/ensenian/catmetad/material/MdA-Scoring-AHP.pdf> [Consulta: 2010]
- [23] Villegas Flores N. “Análisis de valor en la toma de decisiones aplicado a carreteras”. Director: Aguado de Cea A. Universitat Politècnica de Catalunya, Departament d’Enginyeris de la Construcció, Barcelona, 2009.
- [24] Golany B, Kress M. “A Multi-Criteria Evaluation of Methods for Obtaining Weights from Ratio-Scale Matrices”. *European Journal of Operational Research*. 1993. Vol. 69 nº2 p.210-220.
- [25] Tabucanon MT. “Multiple Criteria Decision Making in Industry”. *Studies in Production and Engineering Economics*. Elsevier Science Ltd, 1989. 354 p. ISBN: 978-0444705419.
- [26] Duncan Luce R. “Semiordeers and a Theory of Utiliy Discrimination”. *Econométrica*. 1956. Vol. 24, No.2 p.178-191. DOI: <http://dx.doi.org/10.2307/1905751>.
- [27] Pomerol JC., Barba Romero S. *Multicriterion Decision in Management: Principles and Practice*. Springer Science & Business Media, 2012. 395 p. ISBN: 9781461544593.
- [28] Barba Romero S., Pomerol JC. “Decisiones Multicriterio. Fundamentos Teóricos y Utilización Práctica”. Universidad de Alcalá: Servicio de Publicaciones, 1997, pp.5-36.
- [29] Aznar Bellver J. *Teoría de la Decisión Multicriterio*. [Video]. Grupo de Valoración y Decisión Multicriterio, Universidad Politécnica de Valencia-UPV, 2013.
- [30] Roy B. *The Outranking Approach and the Foundations of ELECTRE Methods. Theory and Decision*. 1991. Vol.31 p.49-73. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF00134132>.

- [31] Brans JP., Vincke Ph. A Preference Ranking Organisation Method (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making). MANAGEMENT SCIENCE. 1985. Vol.31 N°6. Disponible en Web: <http://www.jstor.org/stable/2631441> [Consulta: 2011].
- [32] Brans JP., Vincke Ph., Mareschal B. How to Select and How to Rank Projects: The PROMETHEE Methods. ELSEVIER European Journal of Operational Research. Febrero 1986. Vol.24 p.228-238. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217\(86\)90044-5](http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(86)90044-5).
- [33] Hwang CL., Yoon K. Multiple Attribute Decision Making. 1ª edición. Springer, 1981. 270 p. ISBN: 978-3-540-10558-9.
- [34] Zeleny M., Yong S. New Frontiers of Decision Making for the Information Technology Era. 1ª edition. Scientific Pub Co Inc, 2000. 420p. ISBN: 978-9810242992
- [35] Mellina Fernández M. “Análisis Comparativo de Técnicas de Generación Eléctrica; AHP y Topsis Fuzzificado”. Directora: Cánovas Rodríguez F. Universidad Politécnica de Cartagena, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, Cartagena, 2012.
- [36] Munier N. “Procedimiento fundamentado en la programación lineal para la selección de alternativas en proyectos de naturaleza compleja y con objetivos múltiples”. Directores: Aragonés Beltrán P., Jiménez Sáez F. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2011.
- [37] Ziara, M., Nigim, K., Enshassi, A., Ayyub, B. “Strategic Implementation of Infrastructure Priority Projects: Case Study in Palestine” Journal of Infrastructure Systems. March 2002. Vol.8, No. 1 p.2-11. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2002\)8:1\(2\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2002)8:1(2)).
- [38] Robert Handfielda R., V Walton S. “Applying environmental criteria to supplier assessment: A study in the application of the Analytical Hierarchy Process”. European Journal of Operational Research. August 2002. Vol.141 p.70-87. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(01\)00261-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00261-2).
- [39] Nigim K., Munierb N., Greenc J. “Pre-feasibility MCDM tools to aid communities in prioritizing local viable renewable energy sources”. Renewable

- Energy. September 2004. Vol.29 p.1775-1791. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2004.02.012>.
- [40] Kurttila M., Pesonen M., Kangas J., Kajanusa M. “Utilizing the analytic hierarchy process (AHP) in SWOT analysis — a hybrid method and its application to a forest-certification case”. *Forest Policy and Economics*. May 2000. Vol.1 p. 41–52. DOI: [https://dx.doi.org/10.1016/S1389-9341\(99\)00004-0](https://dx.doi.org/10.1016/S1389-9341(99)00004-0).
- [41] Ananda J., Herath G. “The use of Analytic Hierarchy Process to incorporate stakeholder preferences into regional forest planning”. *Forest Policy and Economics*. January 2003. Vol.5 p.13–26. DOI: [https://dx.doi.org/10.1016/S1389-9341\(02\)00043-6](https://dx.doi.org/10.1016/S1389-9341(02)00043-6).
- [42] Yu-Jing Chiu, Yuh-Wen Chen. “Using AHP in patent valuation”. *Mathematical and Computer Modelling*. October 2007. Vol.46 p.1054–1062. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.mcm.2007.03.009>.
- [43] Brudermann T., Mitterhuber C., Posch A. “Agricultural biogas plants – A systematic analysis of strengths, weaknesses, opportunities and threats”. *Energy Policy*. January 2015. Vol.76 p.107–111. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2014.11.022>.
- [44] Abudeifa AM., Abdel Moneima AA., Farrag AF. “Multicriteria decision analysis based on analytic hierarchy process in GIS environment for siting nuclear power plant in Egypt”. *Annals of Nuclear Energy*. January 2015. Vol.75 p.682–692. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2014.09.024>.
- [45] Yanbing Jua, Aihua Wangb. “Emergency alternative evaluation under group decision makers: A method of incorporating DS/AHP with extended TOPSIS”. *Expert Systems with Applications*. January 2012. Vol.39 p.1315–1323. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2011.08.012>.
- [46] Yanbing Jua, Aihua Wangb, Xiaoyue Liu. “Evaluating emergency response capacity by fuzzy AHP and 2-tuple fuzzy linguistic approach”. *Expert Systems with Applications*. June 2012. Vol.39 p.6972–6981. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2012.01.061>.
- [47] Shenggang Shia, Jingcan Caoa, Li Fenga, Wenyan Lianga, Liqiu Zhanga. “Construction of a technique plan repository and evaluation system based

- on AHP group decision-making for emergency treatment and disposal in chemical pollution accidents”. *Journal of Hazardous Materials*. July 2014. Vol.276 p.200–206. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.05.034>
- [48] Villalobos Sánchez D., Gómez Rodríguez V., Delgado Álvarez N. “El Sistema HACCP. Barreras y acciones para su implementación desde una perspectiva CTS”. *BIBLIOTECA VIRTUAL de Derecho, Economía y Ciencias Sociales*, 2010. P.54-59. ISBN-13: 978-84-693-5711-8. Disponible en Web: <http://www.eumed.net/libros/2010d/793/> [Consulta: 2011].
- [49] Sánchez E. "Aplicación del método experto en los algoritmos examinador para un SAE". *Revista de Investigación de Operaciones*. 1984. Vol.2 p.31-43.
- [50] Cabero Almenara J., Barrosos Osuna J. “La Utilización del Juicio de Experto para la Evaluación de TIC: el Coeficiente de Competencia Experta”. *Bordón*. 2013. Vol.65 N°2 p.25-38.
- [51] García L., Fernández S. “Procedimiento de aplicación del trabajo creativo en grupo de expertos”. *Ingeniería Energética*. 2008. Vol.XXIX N°2 p.46-50.
- [52] Castillo E., Gutiérrez JM., Haidi AS. *Sistemas expertos: modelos y redes probabilísticas*. Madrid: Real Academia de Ingeniería, 1997. 627 p. ISBN 9788460093954
- [53] Talavera Ortiz A., Aguasca Colomo, R., Galván González B. "APPLICATION OF FUZZY LOGIC TO ESTIMATE THE INTENSITY OF THERMAL RADIATION IN HYDROCARBON FIRES". *DYNA*. Mayo 2012. Vol.87, N°3, p.295-304. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/4497>
- [54] Rew PJ, Hulbert WG, Deaves, Deavas DM. “Modelling of thermal radiation from external hydrocarbon pool fires”. *Institution of Chemical Engineers*. 1997. Vol.75, Part B, p.1-89.
- [55] Muñoz M, Arnaldos J, Casal J, Planas E. “Analysis of the geometric and radiative characteristics of hydrocarbon pool fire”. *Combustion and Flame*. 2004. Vol. 139 p.263-277. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.combustflame.2004.09.001>.
- [56] Wilcoxon F. "Individual Comparisons by Ranking Methods". *Biometrics Bulletin*. Diciembre 1945. Vol.1, N°6, p.80-83. Disponible en Web: <http://sci2s.ugr.es/keel/pdf/algorithm/articulo/wilcoxon1945.pdf> [Consulta: 2014].

-
- [57] Calvo Rolle JL, Casteleiro Roca JL, Vilar Martínez XM et al. EXPERT SYSTEM DEVELOPMENT TO ASSIST ON THE VERIFICATION OF "TACAN" SYSTEM PERFORMANCE. DYNA. Enero 2014. Vol.89, N°1, p.112-121. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5756>.
- [58] García Fernández N, Puente J, Fernández I et al. "HOW TO IMPROVE THE SUPPLIERS EVALUATION PROCESS USING FUZZY INFERENCE SYSTEMS". DYNA. Julio 2014. Vol.89, N°4, p.449-456. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/6992>.
- [59] Peña Ayala A. Sistemas basados en Conocimiento: Una Base para su Concepción y Desarrollo. México: Instituto Politécnico Nacional, 2006. 199 p. ISBN 970-94797-4-1
- [60] Barba Romero S., Pomerol JC. Decisiones Multicriterio. Fundamentos Teóricos y Utilización Práctica. Universidad de Alcalá: Servicio de Publicaciones, 1997. 432 p. ISBN 84-8138-180-2
- [61] Aznar Bellver J. AHP (Analytic Hierarchy Process). [Video]. Grupo de Valoración y Decisión Multicriterio, Universidad Politécnica de Valencia-UPV, 2011.
- [62] Aznar Bellver J. AHP aplicado a la valoración ambiental. [Video]. Grupo de Valoración y Decisión Multicriterio, Universidad Politécnica de Valencia-UPV, 2011.
- [63] Aznar Bellver J. Actualización de rentas aplicado a la valoración ambiental. [Video]. Grupo de Valoración y Decisión Multicriterio, Universidad Politécnica de Valencia-UPV, 2011.
- [64] Aznar Bellver J. Curso de valoración y priorización de futbolistas. [21 Videos]. Grupo de Valoración y Decisión Multicriterio, Universidad Politécnica de Valencia-UPV, 2011.
- [65] Aznar Bellver J. Valoración del Paseo del Prado mediante AHP. [Video]. Grupo de Valoración y Decisión Multicriterio, Universidad Politécnica de Valencia-UPV, 2011.
- [66] Aznar Bellver J. Priorización de políticas hídricas. [Video]. Grupo de Valoración y Decisión Multicriterio, Universidad Politécnica de Valencia-UPV, 2011.

- [67] Aznar Bellver J. Proceso Analítico en Red (Analytic Network Process, ANP). [Video]. Grupo de Valoración y Decisión Multicriterio, Universidad Politécnica de Valencia-UPV, 2013.
- [68] Aznar Bellver J. ANP. Matriz de dominación interfactorial. [Video]. Grupo de Valoración y Decisión Multicriterio, Universidad Politécnica de Valencia-UPV, 2013.
- [69] Aznar Bellver J. ANP. Cálculo de las supermatrices original, ponderada y límite. [Video]. Grupo de Valoración y Decisión Multicriterio, Universidad Politécnica de Valencia-UPV, 2013.
- [70] Galindo Villardon MP., Vicente Galindo P. Test no paramétricos: Test de Wilcoxon. [Video]. Universidad de Salamanca, 2013.
- [71] Saaty TL. “Decision making with dependence and feedback: The Analytic Network Process”. 2ª edición. Pittsburgh: RWS Publications, 2001. ISBN 0-9620317-9-8.
- [72] Saaty TL, “Theory and applications of the Analytic Network Process: decision making with benefits, opportunities, costs and risks”. 3ª edición. Pittsburgh: RWS Publications, 2005. ISBN 1-888603-06-2.
- [73] Barragán Piña AJ. Síntesis de Sistemas de Control Borroso Estables por Diseño. Director: Andújar Márquez JM. Universidad de Huelva, Departamento de Ingeniería Electrónica, de Sistemas Informáticos y Automática, 2009.
- [74] Macián Sorribes H. Utilización de Lógica Difusa en la Gestión de Embalses. Aplicación a los Ríos Sorbe, Esla y Mijares. Director: Pulido Velázquez M. Universidad Politécnica de Valencia, 2012.
- [75] Shrestha B., Duckstein L., Stakhiv EZ. Fuzzy Rule-Based Modeling of Reservoir Operation. *Journal of Water Resources Planning and Management*. July-august 1996. P.262-269. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1996\)122:4\(262\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1996)122:4(262)).
- [76] Gobierno de Canarias, Dirección General de Seguridad y Emergencias, Centro Coordinador de Emergencias y Seguridad (CECOES) 1-1-2. De Seguridad y Emergencias [Consulta: 2010-2015].

-
- [77] Gobierno de España. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Agencia Estatal de Meteorología. Gestión de Colaboradores y Gestión de Usuarios [Consulta: 2010-2015].
- [78] Donoso Salgado S. Análisis de Regresión Difusa: Nuevos Enfoques y Aplicaciones. Directores: Martín Ruiz N., Vila Miranda MA. Universidad de Granada, Departamento de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial, 2006.
- [79] Mamdani EH. Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant. Electrical Engineers, Proceedings of the Institution of. December 1974. Vol.121 (12), p.1585-1588. DOI: <http://dx.doi.org/10.1049/piee.1974.0328>
- [80] Mamdani EH., Assilian S. An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller. International Journal of Man-Machine Studies. January 1975. Vol.7 (1), p.1-13. DOI: [http://dx.doi.org/doi:10.1016/S0020-7373\(75\)80002-2](http://dx.doi.org/doi:10.1016/S0020-7373(75)80002-2)
- [81] Bellman RE., Zadeh LA. Decision-Making in a Fuzzy Environment. Management Science. December 1970. Vol.17 N° 4, p.B-141-164. DOI: <http://dx.doi.org/10.1287/mnsc.17.4.B141>
- [82] Yager RR. Multiple objective decision-making using fuzzy sets. International Journal of Man-Machine Studies. July 1977. Vol.9, Issue 4, p.375–382. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0020-7373\(77\)80008-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0020-7373(77)80008-4)
- [83] García N., Puente J., Fernández I. et al. Cómo mejorar la evaluación de proveedores mediante sistemas de inferencia borrosos. DYNA. 2014. Vol.89, N°4, p.449-456. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/6992>
- [84] Vélez Vélez MA. Metodología para mantener la interpretabilidad en el modelado utilizando sistemas borrosos. Director: Sánchez Pérez O. Universidad de Huelva, Departamento de Ingeniería Electrónica, de Sistemas Informáticos y Automática, Huelva, 2012. ISBN: 978-84-15147-70-1
- [85] Marsh S. et al. Fuzzy Logic Education Program. Center for Emerging Computer Technologies. Motorola, 1994.
- [86] Bowen Kenneth A. Prolog and Expert Systems. McGraw–Hill, 1991. 448 p. ISBN-10: 0070067317

- [87] Jackson P. Introduction to Expert Systems. Boston: Addison–Wesley, 1990. 526 p. ISBN:0201175789
- [88] Efraim T. Expert Systems and Applied Artificial Intelligence. Mcmillan Publishing Co, 1992. 832 p. ISBN-10: 0029465656
- [89] Shortliffe EH. Computer-based Medical Consultations: MYCIN. Elsevier Science Ltd, 1976. 286 p. ISBN-10: 0444001794
- [90] Duda R., Gaschnig J., Hart P. Model Design in the Prospector Consultant System for Mineral Exploration. Expert systems in the micro- electronic age. Edinburgh University Press, 1979. P.153-167. Disponible en Web: <http://aitopics.org/publication/model-design-prospector-consultant-system-mineral-exploration> [Consulta: 2015]
- [91] Weiss SM., Kulikowski CA. A Practical Guide to Designing Expert Systems. Artificial Intelligence. February 1985. Vol.25 p.238-239. DOI: [https://dx.doi.org/10.1016/0004-3702\(85\)90006-2](https://dx.doi.org/10.1016/0004-3702(85)90006-2)
- [92] Lindsay RK., Buchanan BG., Feigenbaum EA et al. DENDRAL: a case study of the first expert system for scientific hypothesis formation. Artificial Intelligence. June 1993. Vol.61, p.209-261. DOI: [https://dx.doi.org/10.1016/0004-3702\(93\)90068-M](https://dx.doi.org/10.1016/0004-3702(93)90068-M)
- [93] Berzal F. Sistemas Expertos. Universidad de Granada, Departamento de Ciencias de la Computación e I.A. Disponible en Web: <http://elvex.ugr.es/decsai/computational-intelligence/slides/A2%20Expert%20Systems.pdf> [Consulta: 2015]
- [94] Román Monzo JL., Bobadilla sancho JM. Sistema experto para el control de emergencias en grandes edificios. Maphre Seguridad. Nº 38. 1990. Disponible en Web: http://www.mapfre.com/documentacion/publico/i18n/catalogo_imagenes/grupo.cmd?path=1009526 [Consulta: 2015]
- [95] Miller I., Freund JE. Probabilidad y Estadística para Ingenieros. España: Editorial Reverté, S.A. 2004. 210 p. ISBN: 84-291-5094-3.

ANEXO 1

EJEMPLOS DESARROLLADOS

DE

DECISIÓN MULTICRITERIO

ANEXO 1 - EJEMPLOS DESARROLLADOS DE DECISIÓN MULTICRITERIO

1.1. Ejemplo de ELECTRE I.

Un ejemplo de utilización del método [13] sería:

Enunciado del problema:

Al amparo del convenio de colaboración entre la división de Computación Evolutiva y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería (CEANI) del Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería (SIANI) de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria y el 1-1-2 Canarias, se pretende invertir en un proyecto que tiene como objetivo el análisis, desarrollo e implementación de “Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs)” civiles para su utilización en la “Seguridad, Emergencias y Control de Riesgos en Canarias”

Existen cinco posibilidades y/o alternativas para realizar una primera inversión. Los datos disponibles de los diferentes VANTs son: velocidad de crucero, carga útil, coste y maniobrabilidad.

	Velocidad de crucero (km/h)	Carga útil (gramos)	Coste (euros)	Maniobrabilidad (escala de 1-10)
VANT 1	28	1000	5000	9
VANT 2	34	800	6000	7
VANT 3	28	1200	5000	8
VANT 4	36	700	7000	7
VANT 5	30	900	6000	9

Tabla 59: Datos del problema.

Desarrollo:

Siguiendo los pasos o fases descritos en el método:

1. Se empieza con una matriz de decisiones y un vector de pesos W .

Las posibilidades de inversión, es decir, las posibles alternativas, que son seis y que se denominarán como A_1 , A_2 , A_3 , A_4 , y A_5 , se evaluarán en base a cuatro criterios:

CRITERIOS	DESCRIPCIÓN
C_1	Velocidad de crucero (km/hora)
C_2	Carga útil (en gramos)
C_3	Coste (en euros)
C_4	Maniobrabilidad (escala de 1 a 10)

Tabla 60: Criterios.

Y por tanto la matriz de decisiones será la siguiente:

MATRIZ DE DECISIONES		CRITERIOS			
		C_1	C_2	C_3	C_4
ALTERNATIVA S	A_1	28	1000	5000	9
	A_2	34	800	6000	7
	A_3	28	1200	5000	8
	A_4	36	700	7000	7
	A_5	30	900	6000	9
PESOS		W_1	W_2	W_3	W_4
		0.300	0.050	0.250	0.400

Tabla 61: Matriz de decisiones.

Para este caso, el decisor proporciona el vector de pesos $W = \{0.300, 0.050, 0.250, 0.400\}$. La estimación de los pesos lleva una fuerte carga subjetiva y aunque se pueden emplear diferentes procedimientos, el sugerido por Saaty [3], que constituye la base metodológica multicriterio conocida como Proceso Analítico Jerárquico, resuelve algunas de las dificultades de otros métodos, según Romero [13].

2. Con la matriz de decisiones y el vector de pesos W se calcula la matriz de índices de concordancia. El criterio C_3 es de minimizar, ya que interesa que el coste sea el menor posible, el resto de maximizar. Esto quiere decir que al comparar las alternativa dos a dos, criterio por criterio, cuando se compara por ejemplo A_1 con A_2 con respecto al C_1 se mira si la primera supera a la segunda, si se cumple esta condición se suma el peso del criterio, si no es así se suma cero. Para el caso de C_3

la cosa cambia, ya que al ser de minimizar lo que ocurre es que si A_1 es mayor que A_2 se le suma cero, para el caso contrario se suma el peso del criterio.

Los cálculos realizados para la primera fila de la matriz de índices de concordancia, el resto de filas se obtienen de igual forma, son los siguientes:

$$C(A_1, A_2) = 0 + 0.05 + 0.250 + 0.400 = 0.700$$

$$C(A_1, A_3) = (0.500 \times 0.300) + 0 + (0.500 \times 0.250) + 0.400 = 0.675$$

$$C(A_1, A_4) = 0 + 0.050 + 0.250 + 0.400 = 0.700$$

$$C(A_1, A_5) = 0 + 0.050 + 0.250 + (0.500 \times 0.400) = 0.500$$

MATRIZ DE ÍNDICES DE CONCORDANCIA		ALTERNATIVAS				
		A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅
ALTERNATIVAS	A ₁	-	0.700	0.675	0.700	0.500
	A ₂	0.300	-	0.300	0.500	0.425
	A ₃	0.325	0.700	-	0.700	0.300
	A ₄	0.300	0.500	0.300	-	0.300
	A ₅	0.500	0.575	0.700	0.700	-

Tabla 62: Matriz de índices de concordancia.

Es interesante observar, y que sirve en muchas ocasiones para detectar posibles errores en los cálculos realizados, que por definición de índices de concordancia la suma de los distintos elementos de la matriz simétrica en relación a la diagonal principal ha de ser igual a la unidad.

- Se normaliza la matriz de decisiones inicial con alguno de los procedimientos existentes. Uno de los procedimientos que se pueden emplear para la normalización de los criterios [13] es el que hace que los valores normalizados de los diferentes criterios queden acotados en el intervalo $0 \leq C_i \leq 1$. Esto es en ocasiones interesante en algunos métodos. Se consigue restando al valor más alto que alcanza el criterio por el que se está calculando. Posteriormente se divide por la resta del mayor valor por el menor.

Hay que señalar que el procedimiento de normalización elegido no es intrínseco a ELECTRE, pudiéndose emplear otros procedimientos.

Los cálculos realizados para la primera columna de la matriz normalizada, el resto de columnas se obtienen de igual forma, son los siguientes:

MATRIZ DE DECISIONES NORMALIZADA		CRITERIOS			
		C ₁	C ₂	C ₃	C ₄
ALTERNATIVAS	A ₁	$(36-28)/(36-28)= 1$	0.400	0	0
	A ₂	$(36-34)/(36-28)= 0.250$	0.800	0.500	1
	A ₃	$(36-28)/(36-28)= 1$	0	0	0.500
	A ₄	$(36-36)/(36-28)= 0$	1	1	1
	A ₅	$(36-30)/(36-28)= 0.750$	0.600	0.500	0

Tabla 63: Matriz de decisiones normalizada.

4. Se multiplica cada columna de la matriz normalizada por el peso correspondiente, obteniendo así la matriz de decisiones normalizada y ponderada.

MATRIZ DE DECISIONES NORMALIZADA Y PONDERADA		CRITERIOS			
		C ₁	C ₂	C ₃	C ₄
ALTERNATIVAS	A ₁	$0.300 \times 1 = 0.300$	0.020	0	0
	A ₂	$0.300 \times 0.250 = 0.075$	0.040	0.125	0.400
	A ₃	$0.300 \times 1 = 0.300$	0	0	0.200
	A ₄	$0.300 \times 0 = 0$	0.050	0.250	0.400
	A ₅	$0.300 \times 0.750 = 0.225$	0.030	0.125	0

Tabla 64: Matriz de decisiones normalizada y ponderada.

5. El índice de discordancia $d(i,k)$ entre las alternativas A_i y A_k se calcula a través del cociente cuyo:

- Numerador es la mayor diferencia existente, en valor absoluto, de los criterios para los que la alternativa i es peor que la j

- Denominador es la mayor diferencia, en valor absoluto, entre los resultados alcanzados por la alternativa i y la k.

Por ejemplo:

$$d(A_3, A_5) = \max |0 - 0.030; 0 - 0.125| / \max |0.300 - 0.225; 0 - 0.030; 0 - 0.125; 0.200 - 0|$$

Con respecto al numerador, la mayor diferencia, en valor absoluto, para los que la alternativa 3 es peor que la 5 es $|0 - 0.125|$.

Con respecto al denominador, la mayor diferencia, en valor absoluto, entre los diferentes resultados alcanzados por la alternativa 3 y la 5 es $|0 - 0.125|$.

$$\text{Por lo tanto, } d(A_3, A_5) = |0 - 0.125| / |0.200 - 0| = 0.625$$

Finalmente, con los índices de discordancia se construye la matriz de índices de discordancia.

MATRIZ DE ÍNDICES DE DISCORDANCIA		ALTERNATIVAS				
		A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅
ALTERNATIVAS	A ₁	-	0.563	$d(A_3, A_1) = 0 - 0.020 / 0.200 - 0 = 0.100$	0.750	0.600
	A ₂	1	-	$d(A_3, A_2) = 0.200 - 0.400 / 0.300 - 0.075 = 0.888$	0.600	1
	A ₃	1	1	-	1	1
	A ₄	1	1	$d(A_3, A_4) = 0.250 - 0 / 0.300 - 0 = 0.833$	-	1
	A ₅	1	0.188	$d(A_3, A_5) = 0 - 0.125 / 0.200 - 0 = 0.625$	0.563	-

Tabla 65: Matriz de índices de discordancia.

6. Se fijan los umbrales.

Por la alta subjetividad que contempla, fijar los umbrales constituye una de las partes más débiles de los métodos de sobreclasificación.

Hay que tener en cuenta que los umbrales influyen de forma importante sobre la solución final del problema. Esta es una de las razones por las que conviene someter a los citados umbrales a un análisis de sensibilidad.

Según Romero [13], como valores inicialmente aconsejables se pueden adoptar los dados por los valores medios de los elementos de las matrices de índices de concordancia y discordancia, es decir:

- Umbral mínimo de concordancia, 0,51
- Umbral máximo de discordancia, 0,79

7. Se obtiene la matriz de dominancia concordante aplicando el siguiente procedimiento: si un elemento de la matriz de índices de concordancia es mayor que el valor umbral c_{\min} , en la matriz de dominancia concordante se escribe un uno, sino un cero.

MATRIZ DE DOMINANCIA CONCORDANTE		ALTERNATIVAS				
		A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅
ALTERNATIVAS	A ₁	-	1	1	1	0
	A ₂	0	-	0	0	0
	A ₃	0	1	-	1	0
	A ₄	0	0	0	-	0
	A ₅	0	1	1	1	-

Tabla 66: Matriz de dominancia concordante.

8. Se obtiene la matriz de dominancia discordante aplicando el siguiente procedimiento: si un elemento de la matriz de índices de discordancia es menor que el valor umbral d_{\max} , en la matriz de dominancia discordante se escribe un uno, sino un cero.

MATRIZ DE DOMINANCIA DISCORDANTE		ALTERNATIVAS				
		A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅
ALTERNATIVAS	A ₁	-	1	1	1	1
	A ₂	0	-	0	1	0
	A ₃	0	0	-	0	0
	A ₄	0	0	0	-	0
	A ₅	0	1	1	1	-

Tabla 67: Matriz de dominancia discordante.

9. Se obtiene la matriz de dominancia agregada multiplicando los términos homólogos de las matrices de dominancia concordante y discordante.

MATRIZ DE DOMINANCIA AGREGADA		ALTERNATIVAS				
		A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅
ALTERNATIVAS	A ₁	-	1	1	1	0
	A ₂	0	-	0	0	0
	A ₃	0	0	-	0	0
	A ₄	0	0	0	-	0
	A ₅	0	1	1	1	-

Tabla 68: Matriz de dominancia agregada.

10. Finalmente se obtiene el grafo ELECTRE.

Cada alternativa representa un vértice del citado grafo. Del vértice i al vértice k se traza un arco, si y solo si el correspondiente elemento de la matriz de dominancia agregada es uno. El grafo representa una ordenación parcial de preferencias de las alternativas.

El kernel del grafo está constituido por las alternativas que no se dominan/sobreclasifican entre sí, es decir, no hay arcos de entrada en los correspondientes vértices, quedando las restantes alternativas dominadas/sobreclasificadas por alguna alternativa del kernel. Es decir, existe al

menos algún vértice del kernel del que sale un arco a los vértices que no forman parte del kernel. Las alternativas que no forman parte del kernel se eliminan del proceso de elección.

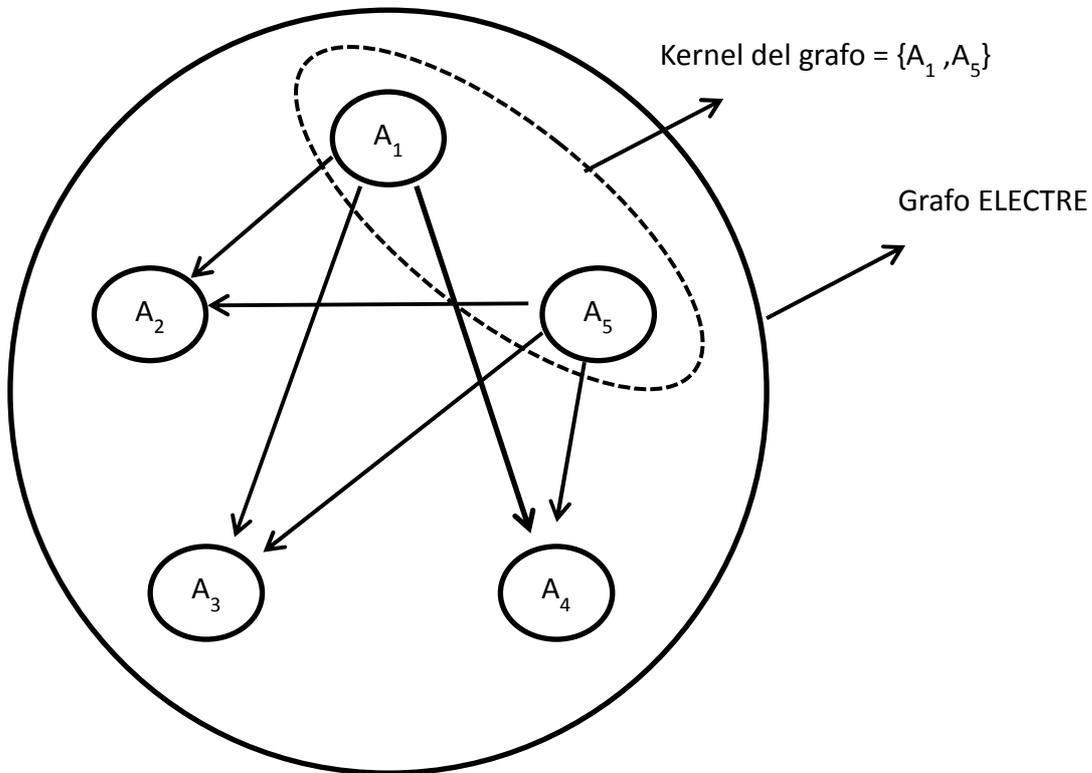


Figura 25: Grafo ELECTRE

Tal y como se muestra en la figura 4.2., y como se ha comentado anteriormente, el núcleo está formado por aquellas alternativas que no se dominan/ sobreclasifican entre sí o, lo que es lo mismo, no existen flechas entrantes. También se ha de cumplir que las restantes alternativas estén dominadas por alguna del núcleo, lo que quiere decir que existe al menos una flecha desde el núcleo hacia los vértices que no forman parte del núcleo.

Con los valores umbrales seleccionados el kernel está formado por las alternativas A_1 y A_5 , siendo estas las soluciones más favorables y sobre las que el decisor/es debe/n centrar su elección.

Como se ha comentado anteriormente, uno de los inconvenientes del método es la gran carga subjetiva que lleva la determinación de los valores umbrales de

concordancia y discordancia, por lo que se hace necesario realizar un análisis de sensibilidad sobre los citados umbrales.

Para este problema, si se disminuye el valor del umbral de concordancia hasta 0,40 el grafo ELECTRE quedaría configurado de la siguiente manera:

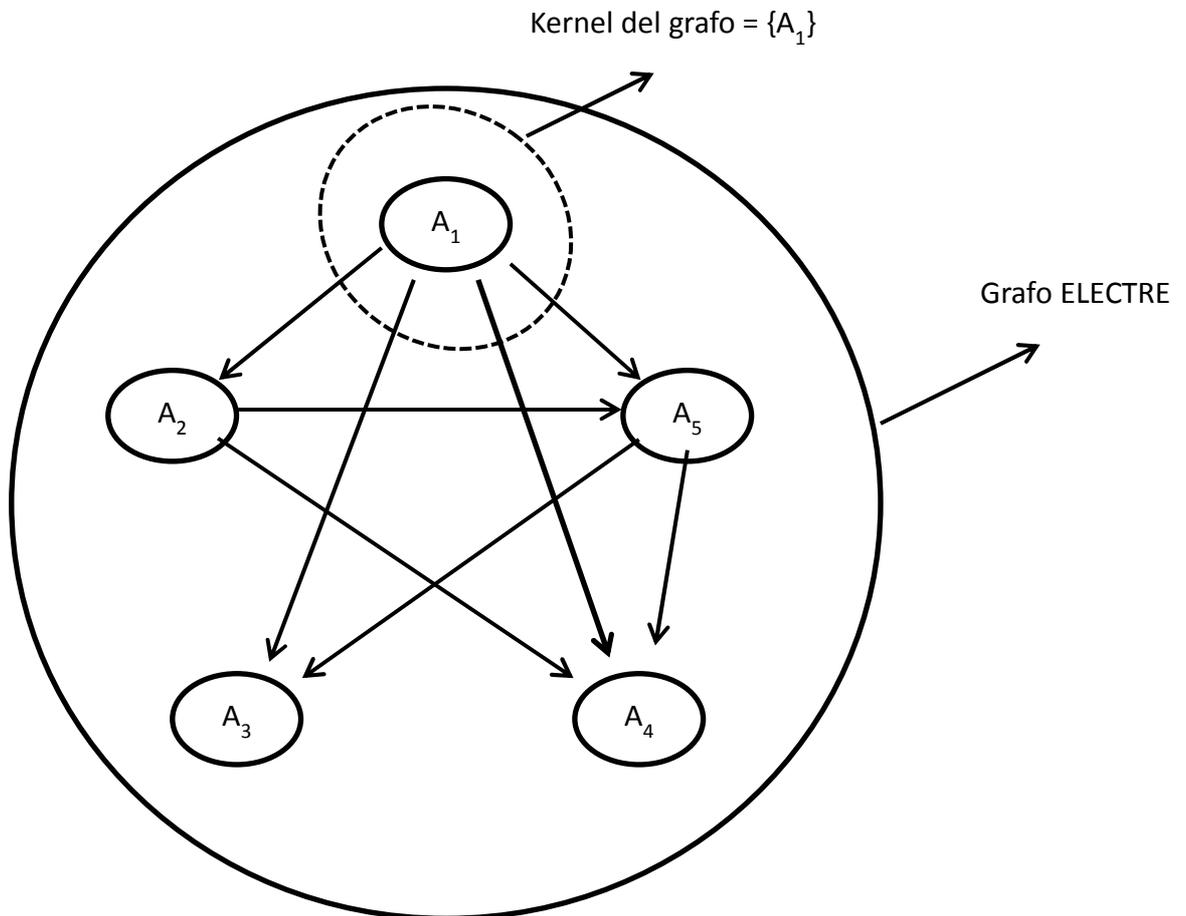


Figura 26: Grafo ELECTRE tras disminución umbral concordancia

Se observa ahora que el núcleo queda reducido a una única alternativa tras disminuir el umbral de concordancia.

1.2. Ejemplo de Ponderación Lineal (SCORING).

Un ejemplo muy sencillo de utilización del método [22] en el que no aparece el problema de la normalización sería:

Enunciado del problema:

Un “Titulado en el Grado de Seguridad y Control de Riesgos” por la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria ha recibido las siguientes ofertas de trabajo:

- a) Técnico en Protección Civil en el Cabildo de Gran Canaria.
- b) Técnico auditor en Seguridad y Control de Riesgos en el Cabildo de La Gomera.
- c) Técnico en Protección Civil en el Cabildo de Tenerife.

El titulado se plantea para tomar una decisión los siguientes criterios:

1. La opción a es la mejor oportunidad para el desarrollo profesional.
2. La opción b le satisface ya que le gustaría vivir en Tenerife.
3. La opción c la considera como la de mejor estilo y filosofía administrativa.

Desarrollo:

Atendiendo a las diferentes fases del método definidas anteriormente:

1. Identificar y definir la meta del problema de decisión: selección de la mejor oferta de empleo.
2. Identificar y definir las alternativas: a, b y c.
3. Identificar y definir los criterios: se extraen de 1, 2 y 3 siendo avance en la carrera, localización, estilo administrativo, remuneración, prestigio, seguridad en el empleo y calidad en el trabajo.
4. Realizar la ponderación de los criterios.

Para ello se emplea una escala de 5 puntos:

ESCALA	
1	Muy poco importante
2	Poco importante
3	Importancia media
4	Algo importante
5	Muy importante

Tabla 69: Escala ponderación de criterios.

CRITERIOS	Ponderación y/o pesos (W_j)
Avance en la carrera	5
Localización	3
Estilo administrativo	4
Remuneración	3
Prestigio	2
Seguridad en el empleo	4
Calidad en el trabajo	5

Tabla 70: Ponderación de criterios.

5. Establecer en cuanto satisface cada alternativa a nivel de cada uno de los criterios.

Para ello se emplea una escala de 9 puntos:

ESCALA	
1	Extra bajo
2	Muy bajo
3	Bajo
4	Poco bajo
5	Medio
6	Poco alto
7	Alto
8	Muy alto
9	Extra alto

Tabla 71: Escala ponderación de alternativas con respecto a los criterios.

CRITERIOS	ALTERNATIVAS		
	a	b	c
Avance en la carrera	8	6	4
Localización	3	8	7
Estilo administrativo	5	6	9
Remuneración	6	7	5
Prestigio	7	5	4
Seguridad en el empleo	4	7	6
Calidad en el trabajo	8	6	5

Tabla 72: Ponderación de alternativas con respecto a los criterios.

Cada valor r_{ij} (8, 3, 5,...) representa el rating de la alternativa i con respecto al criterio j .

6. Calcular el score y/o ponderación para cada alternativa. El score más alto representa a la mejor de las alternativas.

CRITERIOS	Ponderación y/o pesos (W_j)	ALTERNATIVAS					
		a		b		c	
Avance en la carrera	5	8	40	6	30	4	20
Localización	3	3	9	8	24	7	21
Estilo administrativo	4	5	20	6	24	9	36
Remuneración	3	6	18	7	21	5	15
Prestigio	2	7	14	5	10	4	8
Seguridad en el empleo	4	4	16	7	28	6	24
Calidad en el trabajo	5	8	40	6	30	5	25
SCORE O PREFERENCIAS $U(A_i)$			157		167		149

Tabla 73: Tabla con preferencias finales de las alternativas (solución).

Por lo tanto, la mejor oferta es la b “Técnico auditor en Seguridad y Control de Riesgos en el Cabildo de La Gomera”.

1.3. Ejemplo de Proceso Analítico Jerárquico (AHP).

Se desarrolla un ejemplo sencillo, que servirá para una mejor comprensión del método.

Enunciado del problema:

Al amparo del convenio de colaboración entre la división de Computación Evolutiva y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería (CEANI) del Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería (SIANI) de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria y el 1-1-2 Canarias, se pretende invertir en un proyecto que tiene como objetivo el análisis, desarrollo e implementación de “Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs)” civiles para su utilización en “Seguridad, Emergencias y Control de Riesgos en Canarias”

Existen tres posibilidades y/o alternativas para realizar una primera inversión. Los datos disponibles de los diferentes VANTs son: coste, confiabilidad y plazos de entrega.

Desarrollo:

1. Modelar y/o descomponer el problema de decisión a resolver como una jerarquía cuyos elementos estén interrelacionados. Se debe recordar que la estructura jerárquica cuenta con al menos tres niveles básicos (meta u objetivo, criterios y alternativas).

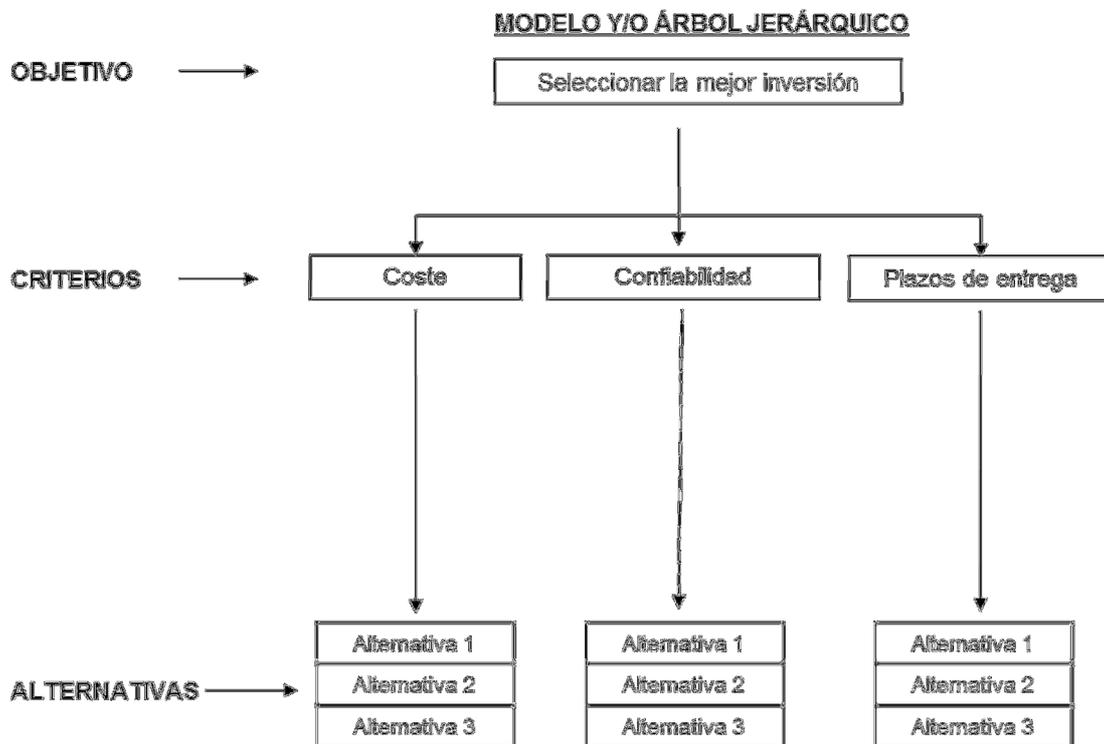


Figura 27: Modelo y/o árbol jerárquico del problema.

2. Después de definir los criterios se ponderan, es decir, se decide si todos ellos influyen de la misma forma en el interés de la alternativa o de forma distinta. Se utiliza para ello la “Matriz de Comparación por Pares” y la escala de Saaty [3].

Tras consultar al decisor/es sobre sus prioridades o preferencias sobre los tres criterios manejados se obtiene la siguiente tabla o matriz de comparación pareada:

	Coste (euros)	Confiabilidad	Plazo de entrega
Coste (euros)	1	5	9
Confiabilidad	1/5	1	3
Plazo de entrega	1/9	1/3	1

Tabla 74: Matriz de comparación pareada para los criterios.

Según la escala de comparación de Saaty [3] y teniendo en cuenta las preferencias del decisor:

- El coste tiene mucha importancia sobre la confiabilidad.
 - El coste tiene extrema importancia sobre el plazo de entrega.
 - La confiabilidad tiene mediana importancia sobre el plazo de entrega.
 - La diagonal está formada por 1, ya que los criterios comparados consigo mismos tienen igual importancia (homogeneidad).
 - Como se cumple la reciprocidad (5.1.1) se obtienen fácilmente el resto de valores.
3. Cálculo de la consistencia de la “Matriz de Comparación por Pares”. Con ello se determinan si los juicios de valor son consistentes o inconsistentes.

El ratio de consistencia (CR), algo que se verá con detalle más adelante, para esta y las diferentes matrices de este ejemplo es inferior al 5%, lo que ratifica la consistencia de los juicios de valores, altamente subjetivos, del decisor/es. Para matrices de rango 3, el ratio de consistencia ha de ser siempre menor del 5%. Si la matriz es ligeramente inconsistente se puede intentar mejorar la consistencia revisando la matriz a partir de las ponderaciones obtenidas. Si por el contrario la matriz es altamente inconsistente, es mejor desecharla.

4. Cálculo del “Autovector o Vector Propio” de la matriz. Este dará el orden y/o ponderación de los criterios que van a permitir tomar la decisión. El cálculo del autovector se explicará con mayor grado de detalle posteriormente.

	Coste (euros)	Confiabilidad	Plazo de entrega	Vector Propio Normalizado
Coste (euros)	1	5	9	0,7533
Confiabilidad	1/5	1	3	0,1773
Plazo de entrega	1/9	1/3	1	0,0694

Tabla 75: Matriz de comparación pareada para los criterios con sus correspondientes vectores propios normalizados que establecen el orden de prioridades para el decisor.

Se observa que para el decisor/es el mayor peso o importancia de los criterios se lo lleva el coste, después la confiabilidad y por último los plazos de entrega.

5. Ahora se procede a comparar las alternativas con respecto a cada criterio. Se plantea la matriz de comparación pareada de las alternativas para cada uno de los criterios, se calculan las consistencias y los autovectores normalizados.

Con respecto al criterio coste:

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Vector Propio Normalizado
Alternativa 1	1	1/3	5	0,2648
Alternativa 2	3	1	9	0,6734
Alternativa 3	1/5	1/9	1	0,0618

Tabla 76: Matriz de comparación pareada para las alternativas con respecto al criterio coste con sus correspondientes vectores propios normalizados que establecen el orden de prioridades para el decisor.

Con respecto al criterio confiabilidad:

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Vector Propio Normalizado
Alternativa 1	1	5	3	0,6397
Alternativa 2	1/5	1	1/3	0,1030
Alternativa 3	1/3	3	1	0,2573

Tabla 77: Matriz de comparación pareada para las alternativas con respecto al criterio confiabilidad con sus correspondientes vectores propios normalizados que establecen el orden de prioridades para el decisor.

Con respecto al criterio plazo de entrega:

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Vector Propio Normalizado
Alternativa 1	1	9	1	0,4737
Alternativa 2	1/9	1	1/9	0,0526
Alternativa 3	1	9	1	0,4737

Tabla 78: Matriz de comparación pareada para las alternativas con respecto al criterio plazo de entrega con sus correspondientes vectores propios normalizados que establecen el orden de prioridades para el decisor.

6. De los pasos anteriores se obtiene un vector propio de los criterios (del 2 al 4) y un vector propio de las alternativas por cada criterio (5) con lo que se implementa la matriz de vectores propios de las alternativas por criterio.

A continuación se multiplican las dos matrices (la de los criterios y la de las alternativas por cada criterio) y se obtiene un vector columna final que indica el peso de cada alternativa y por lo tanto permite elegir la mejor.

	Coste	Confiabilidad	Plazo de entrega		Prioridades globales de las alternativas	
Alternativa 1	0,2648	0,6397	0,4737	×	=	
Alternativa 2	0,6734	0,1030	0,0526			
Alternativa 3	0,0618	0,2573	0,4737			
	$\begin{bmatrix} 0,2648 & 0,6397 & 0,4737 \\ 0,6734 & 0,1030 & 0,0526 \\ 0,0618 & 0,2573 & 0,4737 \end{bmatrix}$				$\begin{bmatrix} 0,7533 \\ 0,1773 \\ 0,0694 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,3458 \\ \mathbf{0,5292} \\ 0,1250 \end{bmatrix}$

La alternativa 2 tiene un peso del 53% aproximadamente, frente al 35% de la alternativa 1 o el 13% de la 3, lo que determina que la mejor solución en base a las valoraciones de los decisores es la 2.

ANEXO 2

DATOS DE EJEMPLO DE ALGUNOS ESCENARIOS OBJETO DE ANÁLISIS

ANEXO 2 – DATOS DE EJEMPLO DE ALGUNOS ESCENARIOS OBJETO DE ANÁLISIS

2.1. FMA transcurrido desde el 29 de enero al 2 de febrero de 2010 (lluvia)

Descripción, evolución, daños y ayudas del fenómeno meteorológico

Una borrasca situada al W-SW del archipiélago canario genera, desde el 31 de enero al 2 de febrero, lluvias en todas las islas. La nubosidad asociada a ella y la fuerte inestabilidad generada deja precipitaciones en todo el Archipiélago, acompañadas por fenómenos tormentosos. Las lluvias más importantes se registran en la Palma, en Gran Canaria y, sobre todo, en la isla de Tenerife donde se producen precipitaciones de tiempo severo (precipitaciones destructivas de tipo torrencial)

En base a los partes meteorológicos recibidos en el CECOES 1-1-2, enviados por la AEMET, desde el día 29 de enero se comienzan a enviar declaraciones de prealerta por diferentes fenómenos y en diferentes islas o ámbitos afectados.

Finalmente, se declara la activación del plan (PEFMA) en situación de alerta a partir de las 00:00 horas del día 31 de enero, por lluvias y tormentas en la provincia de Santa Cruz de Tenerife e isla de Gran Canaria, situación de alerta que se amplía posteriormente a toda la Comunidad Autónoma, a partir de las 14:00 del día 1 de febrero de 2010.

Por otro lado, y en base a la evolución del fenómeno, se declara la situación de Emergencia de Nivel 2 por FMA, a partir de las 18:15 horas del día 1 de febrero.

El Nivel 2 se decreta cuando:

- La influencia del FMA es generalizada en toda la Comunidad Autónoma o en varias islas.
- La gestión de la emergencia requiere la coordinación y movilización de recursos a nivel suprainsular (Autonómicos o de la Administración General del Estado, caso de la Unidad Militar de Emergencias, UME).
- La capacidad de respuesta del dispositivo de protección civil aconseja una dirección unificada de las operaciones.

Se activaron los Planes de Emergencia Insulares de Protección Civil de La Palma, La Gomera, El Hierro y Tenerife, los cuales, además de los municipales, se integraron en el PEFMA desde el punto de vista organizativo y operativo. El mando y la dirección de las operaciones correspondieron al director del PEFMA y consejero de Presidencia Justicia y Seguridad del Gobierno de Canarias.

Se activaron recursos de la Administración General del Estado, tales como la Unidad Militar de Emergencias (UME).

Las zonas más afectadas fueron:

- Área metropolitana de Santa Cruz-Laguna, como consecuencia de las fuertes trombas de agua. En dicha aérea destacan las zonas de Finca España, Valle Tabares, Valle Jiménez y zona de La Cuesta, en La Laguna; y Afur, Almáciga, Taganana y Roque Negro, en Anaga, Santa Cruz de Tenerife.

Las consecuencias y daños más destacables fueron:

- Incomunicación de los vecinos en la zona de Anaga, en Tenerife.
- Suspensión de la actividad escolar el lunes 1 de febrero en El Hierro y en el municipio de Fuencalente, en La Palma. Por la tarde, se suprimieron las actividades extraescolares en el resto de las Islas, excepto en Lanzarote y Fuerteventura.
- Cierre de todos los centros educativos del Archipiélago el martes 2 de febrero para comprobar los accesos a los mismos, así como el estado de las diferentes infraestructuras. En este sentido, al día siguiente se reanudaron las clases en todos los centros educativos, no universitarios de Canarias, excepto en el Centro de Infantil y Primaria Ofra-Chimisay; el CEIP Los Menceyes (Añaza) y las tres escuelas unitarias de Anaga, situadas en Taganana, Almáciga y Roque Negro; todas ellas en Santa Cruz de Tenerife; el CEIP Clorinda Salazar , en el municipio de La Laguna y en los Centros de Infantil y Primaria Froilán Hernández y Granadilla de Abona, de esta localidad.
- Incidencias en el suministro eléctrico con más de 27.000 usuarios afectados por los diferentes cortes en todo el Archipiélago, siendo la isla de Tenerife la más afectada, seguida de El Hierro y, en menor medida , La Gomera.

- El servicio de telefonía fija no sufrió grandes incidencias. En cambio, la telefonía móvil si registró complicaciones debido a los cortes del fluido eléctrico, lo que ocasionó que 79 estaciones base estuvieran funcionando con equipos electrógenos hasta que UNELCO-Endesa restableció el servicio. Además, el suministro de telefonía móvil se vio afectado en un 48% en La Gomera, un 7% en Tenerife, un 7% en La Palma y un 22% en El Hierro.
- En relación a los puertos y aeropuertos, solo se registraron incidencias en el Puerto Industrial de Salinetas, en Telde, y en el Puerto de la Restinga, en la isla de El Hierro.
- Se realizaron desalojos de algunos vecinos de la zona de La Bombilla y El Remo, en el municipio de Los Llanos de Aridane, en La Palma. Además también se evacuó a vecinos del municipio de Fuencaliente, procedentes de los barrios del Charco y Las Caletas
- Suspensión de todos los actos de celebración del Día de la Candelaria.
- Corte de 11 carreteras en Tenerife; ocho en La Palma, una en La Gomera, ocho en El Hierro y dos en Gran Canaria.

Se da por finalizada la situación de Emergencia de Nivel 2 y el inicio de la Fase de Normalización hasta el restablecimiento de las condiciones mínimas imprescindibles para la rehabilitación de los servicios básicos fundamentales a partir de la 18:15 del 2 de febrero de 2010.

Se comenzaron las tareas de rehabilitación en las zonas afectadas, la inspección del estado de edificios, la limpieza de viviendas y vías urbanas, la reparación de los daños más relevantes y la rehabilitación de los servicios básicos fundamentales.

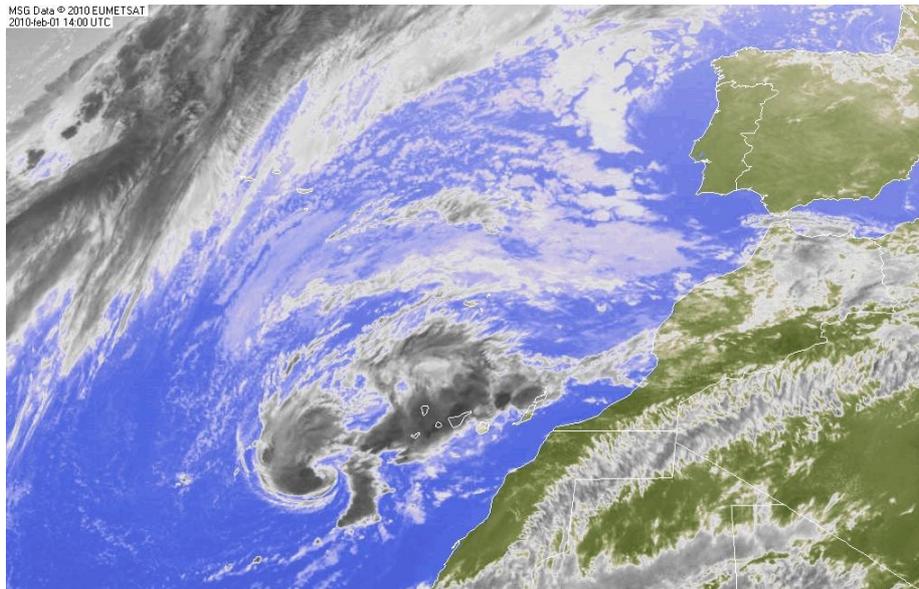
La fase de normalización fue dirigida por los correspondientes Cabildos Insulares a través de sus CECOPIN.

En cuanto a las ayudas, destacar que por Decreto 12/2010, de 4 de febrero, se establecen las ayudas y medidas urgentes y de carácter excepcional para reparar los daños producidos por las lluvias en el Archipiélago los días 31 de enero, 1 y 2 de febrero de 2010.

El apartado primero del artículo 7 del Decreto 12/2010, de 4 de febrero, de ayudas y medidas urgentes y de carácter excepcional para reparar los daños producidos por las lluvias en el Archipiélago los días 31 de enero, 1 y 2 de febrero de 2010, establece que

serán objeto de ayudas, a través de la Consejería de Turismo, los daños materiales directos causados como consecuencia de las lluvias acaecidas en el Archipiélago, con el objeto de contribuir a devolver el establecimiento o la infraestructura turística a su estado original.

Algunas imágenes:



Estado que presentaba la borrasca a las 14:00 horas del día 1 de febrero de 2010.



Imagen de Canariasmet / ACANMET

Partes AEMET

A continuación, y a modo de ejemplo, se muestran algunos de los boletines y notas informativas enviadas por la AEMET (de los más de veinte enviados) antes y durante el transcurso del FMA.

- Nota informativa AEMET del día 29 de enero de 2010.

**LLUVIAS FUERTES EN CANARIAS**

Información elaborada el día 29 de enero de 2010

Se espera que una borrasca situada sobre el Atlántico, al oeste de Canarias, se aproxime a las islas en los próximos días dando lugar a lluvias fuertes y persistentes sobre el archipiélago, con intervalos de viento fuerte y temporal en la mar.

Se prevé que las precipitaciones comiencen a últimas horas del sábado, día 30, en las islas más occidentales, intensificándose durante los días siguientes y extendiéndose de oeste a este al resto del archipiélago.

Durante el domingo 31 se prevén chubascos moderados a fuertes, ocasionalmente muy fuertes, persistentes y con tormenta, en la mitad occidental de Canarias, sobre todo en las vertientes sur de las islas de mayor relieve. Es probable que las precipitaciones ocasionalmente moderadas también afecten durante este día a las islas orientales. Las precipitaciones vendrán acompañadas de vientos de componente sur moderados a fuertes y temporal en la mar.

El lunes día 1 se esperan chubascos localmente muy fuertes y con tormenta en las islas occidentales y Gran Canaria, con mayor probabilidad en las vertientes sur y oeste, manteniéndose los vientos fuertes y el mal estado de la mar.

Esta situación de tiempo adverso en el archipiélago canario es probable que persista hasta el próximo miércoles día 3.

- A continuación, se muestra una segunda nota informativa de la AEMET del día 30 de enero de 2010, ajustando la predicción del fenómeno. En la predicción del día 29 se indica que el fenómeno es probable que persista hasta el miércoles día 3, frente a la predicción del día 30 que ya habla del martes día 2 como fecha en la que es probable que la intensidad de las precipitaciones comience a disminuir. El término

probable, meteorológicamente hablando, marca el nivel de ocurrencia del fenómeno entre el 40 y el 70%.



LLUVIAS FUERTES EN CANARIAS

Información elaborada el día 30 de enero de 2010

Se espera que una borrasca situada sobre el Atlántico, al oeste de Canarias, se aproxime a las islas en los próximos días dando lugar a lluvias fuertes y persistentes sobre el archipiélago, con intervalos de viento fuerte y temporal en la mar.

Se prevé que las precipitaciones comiencen, con intensidad débil, a últimas horas hoy, día 30, en las islas más occidentales. Se intensificarán y extenderán de oeste a este al resto del archipiélago, durante el domingo, día 31, manteniéndose esta situación hasta el martes, día 2.

Durante el domingo 31, en las islas de mayor relieve, se prevén chubascos moderados a fuertes, localmente muy fuertes, persistentes y con tormentas. Es probable que las precipitaciones, con intensidad moderada localmente fuerte y acompañadas de tormentas, afecten también a las islas orientales, a partir del mediodía. Las precipitaciones vendrán acompañadas de viento de componente sur moderado a fuerte y temporal en la mar.

Esta situación de tiempo adverso, en el archipiélago canario, se mantendrá durante los días 1 y 2 de febrero, aunque durante el martes, día 2, es probable que la intensidad de las precipitaciones comience a disminuir.

- Algunos boletines:

BOLETÍN NÚMERO 1/CCS

EMITIDO A LAS 10:30 HORA OFICIAL (CANARIA) DEL 30/01/2010

C. AUTÓNOMA: CANARIAS

FENÓMENOS PREVISTOS

Fenómeno (1) - Lluvias.

Precipitación acumulada en una hora: 30 mm.

Precipitación acumulada en 12 horas: 120 mm.

Nivel: naranja.

Ámbito geográfico: La Palma; La Gomera; El Hierro.

Hora de comienzo: 00:00 hora oficial (canaria) del 31/01/2010.

Hora de finalización: 00:00 hora oficial (canaria) del 01/02/2010.

Probabilidad: 40%-70%.

Comentario: LAS PRECIPITACIONES ESTARÁN ACOMPAÑADAS DE TORMENTAS.

Fenómeno (2) - Lluvias.

Precipitación acumulada en una hora: 30 mm.

Precipitación acumulada en 12 horas: 120 mm.

Nivel: naranja.

Ámbito geográfico: Tenerife.

Hora de comienzo: 03:00 hora oficial (canaria) del 31/01/2010.

Hora de finalización: 00:00 hora oficial (canaria) del 01/02/2010.

Probabilidad: 40%-70%.

Comentario: LAS PRECIPITACIONES ESTARÁN ACOMPAÑADAS DE TORMENTAS.

Fenómeno (3) - Lluvias.

Precipitación acumulada en una hora: 30 mm.

Precipitación acumulada en 12 horas: 120 mm.

Nivel: naranja.

Ámbito geográfico: Gran Canaria.

Hora de comienzo: 06:00 hora oficial (canaria) del 31/01/2010.

Hora de finalización: 00:00 hora oficial (canaria) del 01/02/2010.

Probabilidad: 40%-70%.

Comentario: LAS PRECIPITACIONES ESTARÁN ACOMPAÑADAS DE TORMENTAS.

BOLETÍN NÚMERO 6/CCS

EMITIDO A LAS 22:41 HORA OFICIAL (CANARIA) DEL 01/02/2010

C. AUTÓNOMA: CANARIAS

FENÓMENOS PREVISTOS

Fenómeno (1) - Lluvias.

Precipitación acumulada en una hora: 30 mm.

Nivel: naranja.

Ámbito geográfico: Gran Canaria (Costa norte, Medianías norte).

Hora de comienzo: 22:00 hora oficial del 01/02/2010.

Hora de finalización: 18:00 hora oficial del 02/02/2010.

Probabilidad: 40%-70%.

Fenómeno (2) - Lluvias.

Precipitación acumulada en una hora: 30 mm.

Precipitación acumulada en 12 horas: 120 mm.

Nivel: naranja.

Ámbito geográfico: Gran Canaria (Cumbres, Este, sur y oeste); La

Gomera; Tenerife.

Hora de comienzo: 22:00 hora oficial del 01/02/2010.

Hora de finalización: 18:00 hora oficial del 02/02/2010.

Probabilidad: 40%-70%.

Fenómeno (3) - Lluvias.

Precipitación acumulada en una hora: 30 mm.

Precipitación acumulada en 12 horas: 120 mm.

Nivel: naranja.

Ámbito geográfico: La Palma; El Hierro.

Hora de comienzo: 22:00 hora oficial del 01/02/2010.

Hora de finalización: 12:00 hora oficial del 02/02/2010.

Probabilidad: 40%-70%.

Fenómeno (4) - Lluvias.

Precipitación acumulada en una hora: 30 mm.

Nivel: naranja.

Ámbito geográfico: Lanzarote; Fuerteventura.

Hora de comienzo: 06:00 hora oficial del 02/02/2010.

Hora de finalización: 00:00 hora oficial del 03/02/2010.

Probabilidad: 40%-70%.

Fenómeno (5) - Vientos.

Rachas máximas: 90 km/h.

Nivel: naranja.

Ámbito geográfico: La Palma (Cumbres).

Hora de comienzo: 22:00 hora oficial del 01/02/2010.

Hora de finalización: 18:00 hora oficial del 02/02/2010.

Probabilidad: 40%-70%.

Fenómeno (6) - Vientos.

Rachas máximas: 90 km/h.

Nivel: naranja.

Ámbito geográfico: Gran Canaria (Medianías norte, Cumbres, Este, sur y oeste).

Hora de comienzo: 00:00 hora oficial del 02/02/2010.

Hora de finalización: 00:00 hora oficial del 03/02/2010.

Probabilidad: 40%-70%.

Fenómeno (7) - Vientos.

Rachas máximas: 90 km/h.

Nivel: naranja.

Ámbito geográfico: La Gomera; El Hierro; Tenerife (La Orotava y

Vilaflor, Este, sur y oeste).

Hora de comienzo: 00:00 hora oficial del 02/02/2010.

Hora de finalización: 18:00 hora oficial del 02/02/2010.

Probabilidad: 40%-70%.

Fenómeno (8) - Tormentas.

Nivel: naranja.

Ámbito geográfico: Gran Canaria; La Gomera; Tenerife.

Hora de comienzo: 22:00 hora oficial del 01/02/2010.

Hora de finalización: 18:00 hora oficial del 02/02/2010.

Probabilidad: 40%-70%.

Fenómeno (9) - Tormentas.

Nivel: naranja.

Ámbito geográfico: La Palma; El Hierro.

Hora de comienzo: 22:00 hora oficial del 01/02/2010.

Hora de finalización: 12:00 hora oficial del 02/02/2010.

Probabilidad: 40%-70%.

Fenómeno (10) - Tormentas.

Nivel: naranja.

Ámbito geográfico: Lanzarote; Fuerteventura.

Hora de comienzo: 06:00 hora oficial del 02/02/2010.

Hora de finalización: 00:00 hora oficial del 03/02/2010.

Probabilidad: 40%-70%.

COMENTARIO: Los vientos serán de dirección suroeste a oeste.

Declaraciones de prealertas, alertas y actualizaciones hechas por la DGSE en base a las predicciones de la AEMET

Declaraciones de prealertas, alertas y actualizaciones hechas por la DGSE en base a las predicciones de la AEMET	Fecha de envío a recursos	Fenómeno meteorológico
Se recibe parte de AEMET y se declara PREALERTA a partir del día 31/01/2010	29/01/2010	LLUVIAS PROVINCIA S/C DE TENERIFE E ISLA DE GRAN CANARIA Y VIENTO EN TFE.
Se recibe parte de AEMET y se declara PREALERTA a partir del día 31/01/2010	30/01/2010	LLUVIAS Y TORMENTAS EN LA COMUNIDAD AUTÓNOMA CANARIA..
Se recibe parte de AEMET y se declara PREALERTA a partir del día 31/01/2010	30/01/2010	VIENTOS EN LA COMUNIDAD AUTÓNOMA CANARIA..
Se recibe parte de AEMET y se declara ALERTA a partir del día 31/01/2010	30/01/2010	LLUVIAS Y TORMENTAS PROVINCIA S/C DE TENERIFE E ISLA DE GRAN CANARIA.
Se recibe parte de AEMET y se declara PREALERTA a partir del día 01/02/2010	31/01/2010	COSTEROS EN GOMERA, HIERRO Y TENERIFE
Se recibe parte de AEMET y se declara ACTUALIZACIÓN PREALERTA a partir del día 31/01/2010	31/01/2010	LLUVIAS Y TORMENTAS LANZAROTE Y FUERTEVENTURA
Se recibe parte de AEMET y se declara ACTUALIZACIÓN ALERTA	31/01/2010	LLUVIAS Y TORMENTAS PROVINCIA S/C DE TENERIFE E ISLA DE GRAN CANARIA.
Se recibe parte de AEMET y se declara ACTUALIZACIÓN PREALERTA	31/01/2010	VIENTOS EN LA COMUNIDAD AUTÓNOMA CANARIA.
Se recibe parte de AEMET y se declara ACTUALIZACIÓN ALERTA	01/02/2010	LLUVIAS Y TORMENTAS EN LA COMUNIDAD AUTÓNOMA CANARIA..

Se recibe parte de AEMET y se declara ACTUALIZACIÓN PREALERTA	01/02/2010	VIENTOS LANZAROTE Y FUERTEVENTURA
DECLARACIÓN NIVEL DE EMERGENCIA 2	01/02/2010	LLUVIAS INTENSAS GENERALIZADAS EN DIFERENTES ISLAS DEL ARCHIPIÉLAGO
FIN DECLARACIÓN NIVEL DE EMERGENCIA 2	02/02/2010	LLUVIAS INTENSAS GENERALIZADAS EN DIFERENTES ISLAS DEL ARCHIPIÉLAGO
DECLARACIÓN INICIO FASE NORMALIZACIÓN	02/02/2010	

Actividad generada por el fenómeno meteorológico en el CECOES 1-1-2

A continuación, se presenta la actividad que se generó en el 1-1-2 como consecuencia del Fenómeno Meteorológico Adverso. Es importante destacar que la interpretación de esta actividad, conjuntamente con los datos de las estaciones meteorológicas, corrobora el grado de actividad de la predicción.

Día 31 de enero de 2010

	LPA	TFE	Canarias
Incidentes	788	619	1.407
Sanidad	431	274	705
Seguridad Ciudadana	230	253	483
Asistencia Técnica	60	36	96
Incendios	12	9	21
Accidentes	55	45	100
Salvamento Marítimo	0	2	2

Comparativa con el día 24 de enero (domingo normal del mismo mes)

	LPA 31/01	LPA 24/01	Incremento LPA	TFE 31/01	TFE 24/01	Incremento TFE	CAN 31/01	CAN 24/01	Incremento CAN
Incidentes	788	668	17,96%	619	541	14,42%	1.407	1.209	16,38%
Sanidad	431	370	16,49%	274	238	15,13%	705	608	15,95%
Seguridad Ciudadana	230	221	4,07%	253	211	19,91%	483	432	11,81%
Asistencia Técnica	60	28	114,29%	36	27	33,33%	96	55	74,55%
Incendios	12	10	20,00%	9	8	12,50%	21	18	16,67%
Accidentes	55	39	41,03%	45	55	-18,18%	100	94	6,38%
Salvamento Marítimo	0	0		2	2	0,00%	2	2	0,00%

Día 1 de febrero de 2010

	LPA	TFE	Canarias
Incidentes	919	1573	2.492
Sanidad	407	290	697
Seguridad Ciudadana	214	418	632
Asistencia Técnica	206	716	922
Incendios	15	17	32
Accidentes	73	129	202
Salvamento Marítimo	4	3	7

Comparativa con el día 25 de enero (lunes normal del mismo mes)

	LPA 01/02	LPA 25/01	Incremento LPA	TFE 01/02	TFE 25/01	Incremento TFE	CAN 01/02	CAN 25/01	Incremento CAN
Incidentes	919	684	34,36%	1.573	604	160,43%	2.492	1.288	93,48%
Sanidad	407	407	0,00%	290	303	-4,29%	697	710	-1,83%
Seguridad Ciudadana	214	160	33,75%	418	213	96,24%	632	373	69,44%
Asistencia Técnica	206	26	692,31%	716	20	3480,00%	922	46	1904,35%
Incendios	15	11	36,36%	17	9	88,89%	32	20	60,00%
Accidentes	73	79	-7,59%	129	58	122,41%	202	137	47,45%
Salvamento Marítimo	4	1	300,00%	3	1	200,00%	7	2	250,00%

Día 2 de febrero de 2010

	LPA	TFE	Canarias
Incidentes	765	1.168	1.933
Sanidad	391	272	663
Seguridad Ciudadana	220	349	569
Asistencia Técnica	78	471	549
Incendios	10	16	26
Accidentes	64	57	121
Salvamento Marítimo	2	3	5

Comparativa con el día 26 de enero (otro martes del mismo mes)

	LPA 02/02	LPA 26/01	Incremento LPA	TFE 02/02	TFE 26/01	Incremento TFE	CAN 02/02	CAN 26/01	Incremento CAN
Incidentes	765	664	15,21%	1.168	555	110,45%	1.933	1.219	58,57%
Sanidad	391	388	0,77%	272	269	1,12%	663	657	0,91%
Seguridad Ciudadana	220	183	20,22%	349	204	71,08%	569	387	47,03%
Asistencia Técnica	78	27	188,89%	471	28	1582,14%	549	55	898,18%
Incendios	10	7	42,86%	16	7	128,57%	26	14	85,71%
Accidentes	64	57	12,28%	57	46	23,91%	121	103	17,48%
Salvamento Marítimo	2	2	0,00%	3	1	200,00%	5	3	66,67%

A continuación, se desglosa la actividad por islas y por municipios. Todos estos datos servirán con posterioridad para poder analizar la repercusión del fenómeno en los diferentes municipios.

Por municipio	31/1/2010	24/1/2010	Incremento	1/2/2010	25/1/2010	Incremento	2/2/2010	26/1/2010	Incremento
GRAN CANARIA	642	539	19,11%	789	569	38,66%	642	548	17,15%
Las Palmas de Gran Canaria	303	276	9,78%	333	313	6,39%	310	298	4,03%
Telde	72	61	18,03%	136	60	126,67%	95	62	53,23%
Santa Lucia	52	38	36,84%	35	32	9,38%	28	27	3,70%
San Bartolomé de Tirajana	64	53	20,75%	75	50	50,00%	40	39	2,56%
Arucas	9	18	-50,00%	23	9	155,56%	32	28	14,29%
Ingenio	19	16	18,75%	43	17	152,94%	14	11	27,27%
Gáldar	15	10	50,00%	18	12	50,00%	21	17	23,53%
Agüimes	17	12	41,67%	46	12	283,33%	17	8	112,50%
Santa Brígida	14	6	133,33%	7	10	-30,00%	11	11	0,00%
Santa María de Guía	12	6	100,00%	7	6	16,67%	11	7	57,14%
Teror	9	7	28,57%	1	4	-75,00%	12	4	200,00%
Mogán	20	18	11,11%	22	16	37,50%	24	9	166,67%
Moya	4	2	100,00%	6	4	50,00%	3	10	-70,00%
San Nicolás de Tolentino	6	5	20,00%	6	8	-25,00%	3	4	-25,00%
Valsequillo	4	4	0,00%	5	1	400,00%	1	3	-66,67%
Vega de San Mateo	10	1	900,00%	7	3	133,33%	5	3	66,67%
Firgas	2	1	100,00%	3	5	-40,00%	6	2	200,00%
Agaete	2	1	100,00%	9	5	80,00%	1	2	-50,00%
Valleseco	4	2	100,00%	2			1	1	0,00%
Tejeda	3	2	50,00%	2			5	1	400,00%

Artenara	1			1	1	0,00%	2	1	100,00%
Mar				2	1	100,00%			
LANZAROTE	92	80	15,00%	90	67	34,33%	74	71	4,23%
Arrecife	43	40	7,50%	45	22	104,55%	30	33	-9,09%
Tías	15	13	15,38%	18	23	-21,74%	19	14	35,71%
San Bartolomé	6	4	50,00%	6	3	100,00%	7	8	-12,50%
Teguise	11	8	37,50%	8	5	60,00%	9	5	80,00%
Tinajo	3				1	-100,00%	1	2	-50,00%
Haría	3	6	-50,00%	4	2	100,00%	5	6	-16,67%
Yaiza	11	8	37,50%	8	11	-27,27%	3	3	0,00%
Mar		1	-100,00%	1					
FUERTEVENTURA	54	49	10,20%	40	48	-16,67%	49	45	8,89%
Puerto del Rosario	22	22	0,00%	23	20	15,00%	21	15	40,00%
Tuineje	8	6	33,33%	1	7	-85,71%	8	9	-11,11%
La Oliva	8	15	-46,67%	6	8	-25,00%	6	5	20,00%
Pájara	12	3	300,00%	6	10	-40,00%	10	12	-16,67%
Antigua	4	2	100,00%	4	3	33,33%	3	3	0,00%
Betancuria		1	-100,00%				1		
Mar								1	-100,00%

TOTAL PROV. LAS PALMAS

788	668	17,96%	919	684	34,36%	765	664	15,21%
-----	-----	--------	-----	-----	--------	-----	-----	--------

Por municipio	1/31/2010	1/24/2010	Incremento	2/1/2010	1/25/2010	Incremento	2/2/2010	1/26/2010	Incremento
TENERIFE	547	492	11,18%	1.481	543	172,74%	1.053	477	120,75%
Santa Cruz de Tenerife	153	119	28,57%	609	175	248,00%	445	138	222,46%
La Laguna	81	90	-10,00%	395	94	320,21%	191	81	135,80%
La Orotava	15	19	-21,05%	18	24	-25,00%	24	18	33,33%
Los Realejos	13	11	18,18%	8	9	-11,11%	7	14	-50,00%
Arona	59	52	13,46%	54	52	3,85%	52	42	23,81%
Puerto de la Cruz	30	36	-16,67%	34	34	0,00%	34	39	-12,82%
Icod de los Vinos	10	10	0,00%	7	5	40,00%	5	7	-28,57%
Tacoronte	6	7	-14,29%	14	16	-12,50%	11	9	22,22%
Granadilla de Abona	18	23	-21,74%	44	11	300,00%	37	17	117,65%
Adeje	34	36	-5,56%	36	20	80,00%	33	22	50,00%
Güímar	19	13	46,15%	29	10	190,00%	20	12	66,67%
Guía de Isora	10	13	-23,08%	25	6	316,67%	22	14	57,14%
Candelaria	16	14	14,29%	54	11	390,91%	58	11	427,27%
El Rosario	11	3	266,67%	57	12	375,00%	54	4	1250,00%
Santa Úrsula	9	2	350,00%	14	5	180,00%	3	5	-40,00%
Tegueste	1	2	-50,00%	10	3	233,33%	8	2	300,00%
La Victoria de Acentejo	3	8	-62,50%	4	6	-33,33%	6	3	100,00%
Santiago del Teide	9	5	80,00%	11	9	22,22%	6	8	-25,00%
Sauzal	4	3	33,33%	2	3	-33,33%		2	-100,00%

La Matanza de Acentejo	4	2	100,00%		8	-100,00%	4	3	33,33%
San Miguel	9	4	125,00%	16	11	45,45%	5	8	-37,50%
Garachico	1	1	0,00%	1	3	-66,67%	5	1	400,00%
Buenavista del Norte	4	1	300,00%	2	1	100,00%	3	2	50,00%
Los Silos	2	4	-50,00%	3	3	0,00%	1	2	-50,00%
La Guancha	4	2	100,00%	2			1	3	-66,67%
Arico	6	4	50,00%	15	2	650,00%	7	4	75,00%
San Juan de la Rambla	3			1	5	-80,00%		1	-100,00%
Arafo	3	3	0,00%	8	3	166,67%	4	1	300,00%
El Tanque	1	2	-50,00%				3		
Fasnia	5	1	400,00%	4	1	300,00%	1	2	-50,00%
Vilaflor	1							1	-100,00%
Mar	3	2	50,00%	4	1	300,00%	3	1	200,00%
LA PALMA	41	37	10,81%	37	43	-13,95%	72	53	35,85%
Los Llanos de Aridane	16	13	23,08%	14	15	-6,67%	18	13	38,46%
Santa Cruz de la Palma	6	5	20,00%	3	5	-40,00%	16	13	23,08%
El Paso	2	1	100,00%	2	3	-33,33%	4	2	100,00%
Tzacorte	1	5	-80,00%	1	2	-50,00%	7	1	600,00%
Breña Alta	3	3	0,00%	5	3	66,67%	7	6	16,67%
San Andrés y Sauces	3			4	3	33,33%	5	3	66,67%
Villa de Mazo	3	1	200,00%	6	1	500,00%	3	1	200,00%

Breña Baja	2	1	100,00%		1	-100,00%	2	1	100,00%
Tijarafe		1	-100,00%	1	4	-75,00%	2	3	-33,33%
Barlovento		1	-100,00%				1	2	-50,00%
Puntallana	2	1	100,00%		3	-100,00%	4	1	300,00%
Garafía		1	-100,00%				2	1	100,00%
Puntagorda		2	-100,00%		3	-100,00%	1	5	-80,00%
Fuencaliente de La Palma	3	2	50,00%	1				1	-100,00%
LA GOMERA	19	9	111,11%	19	13	46,15%	22	21	4,76%
San Sebastián de La Gomera	11	4	175,00%	8	5	60,00%	3	4	-25,00%
Valle Gran Rey		1	-100,00%		4	-100,00%	2	1	100,00%
Vallehermoso	3	2	50,00%	3			5	3	66,67%
Hermigua	3	2	50,00%	3	2	50,00%	5	10	-50,00%
Agulo				2			1		
Alajeró	2			3	2	50,00%	6	3	100,00%
EL HIERRO	12	3	300,00%	36	5	620,00%	21	4	425,00%
Frontera	1	1	0,00%	21	2	950,00%	8	1	700,00%
Valverde	11	2	450,00%	15	3	400,00%	12	3	300,00%
Mar							1		

TOTAL PROV. S/C DE TFE

619	541	14,42%	1.573	604	160,43%	1.168	555	110,45%
-----	-----	--------	-------	-----	---------	-------	-----	---------

Datos de precipitaciones:

- Tenerife, el día 1 de Febrero, fuente: Cabildo de Tenerife

<i>Localización Estación</i>	<i>Altitud (m)</i>	<i>Precipitación Total en 24h (en mm)</i>	<i>Intensidad máxima de precipitación (mm/m²h)</i>
El Rosario	655	260,1	119
Güímar (Barranco Badajoz)	340	227,3	87
Guía de Isora	476	72,7	86
Guía de Isora (Aripe)	1032	107,3	77
Granadilla (El Pinalete)	850	68	77
Güímar (Lomo de Mena)	500	142	77
Guía de Isora (El Pozo)	700	87,4	74
Arafo	700	156,7	64,5
Granadilla	505	57,8	63,5
Güímar (El Topo)	290	218,1	61,5
Guía de Isora (Chio)	735	91,1	60,5
Arico (Ortiz)	725	134,4	60,5
Arico (el Bueno)	930	169,1	53,5

- Gran Canaria, fuente: Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria

<i>Localización Estación</i>	<i>Precipitación Total en 24h(en mm)</i>
Valsequillo (Cuevas blancas)	145,5
Tejeda (La Culata de Tejeda)	144,5
Vega de San Mateo (Lomo Aljorradero)	113,3
Vega de San Mateo (Cruz de Tejeda)	84,4

- Datos de estaciones privadas

<i>Localización</i>	<i>Precipitación total en 24h (mm). Día 1</i>
Jardina, La Laguna	270
Finca España, La Laguna	242
Museo de la Ciencia, La Laguna	233
San Miguel de Geneto, LaLaguna	226
San Cristóbal de La Laguna, centro	220
Los Andenes, Taco	212
La Gallega, S/C de Tenerife	210
Güímar, casco urbano	194
La Cuesta, La Laguna	164
La Esperanza, El Rosario	141
Los Baldíos, La Laguna	140

- Datos significativos de las Estaciones de la AEMET:

	Localización Estación	Intensidad de Precipitación, mm/m ² h		
		31 Enero	1 Febrero	2 Febrero
LANZAROTE	Aeropuerto Lanzarote		42	-
	Haría Casco	-	72	48
	Tinajo	-	72	12
FUERTEVENTURA	Puerto Morro Jable	-	-	-
	Puerto Gran Tarajal	-	-	60
	Puerto del Rosario	-	36	3
	Puerto de Corralejo	-	36	24
GRAN CANARIA	Cruz de Tejeda	-	-	-
	Agate Casco	-	-	-
	S. B. Tirajana (Lomos de Pedro Afonso)	-	-	-
	Puerto Mogán	60	-	-
	S. B. Tirajana (Casco)	-	-	-
	S.B. Tirajana (El Matorral)	-	-	-
	Agüimes	36	-	-
	Telde (Centro forestal Doramas)	-	-	-
	Aeropuerto de Gando	33	-	-
	Telde (Melenara)	-	-	-
	Teror (Osorio)	-	-	-
	Las Palmas de G.C. (Tafira)	-	-	-
	Aruces	12	-	-
	Hotel Faro Maspalomas (S.B. Tirajana)	-	-	-
EL HIERRO	El Pinar	-	-	-
	San Andrés	-	-	-
	Aeropuerto de los Cangrejos	-	-	-
	Sabinosa (Balneario)	-	-	-
LA PALMA	Puntagorda		180 *	228 *
	Tijarafe (Mirador Time)		216	192
	El Paso C. F.		-	-
	Aeropuerto Mazo	108	-	-
	San Andrés y Sauces		-	-

LA GOMERA	Vallehermoso (Dama)		45	36
	Aeropuerto de la Gomera		87	48
	San Sebastián	72	-	30
TENERIFE	Parador de las Cañadas		-	-
	Adeje		-	-
	Arico		-	-
	Arona		12	-
	Aeropuerto del Sur		12	-
	Izaña		-	-
	Candelaria		75	40
	Las Mercedes-Llano los Loros		-	-
	Aeropuerto del Norte	12	-	-
	Santa Cruz de Tenerife	54	-	54
	La Victoria	-	-	-
	Puerto de la Cruz	-	-	-
	San Juan de la Rambla	-	-	-
	Los Silos	-	-	-

Datos Sombreados, intensidad de precipitación de tipo torrencial; * Rachas de viento de +100km/h.

2.2. FMA acaecido entre el 29 y el 31 de Enero de 2011

Descripción, evolución y consecuencias del fenómeno meteorológico.

La aproximación de una profunda borrasca de bajas presiones, que penetró por el suroeste del archipiélago, generó tiempo muy inestable y precipitaciones continuas, con chubascos moderados. La afectación se determinó generalizada para todas las islas, iniciándose el episodio por las islas de El Hierro y La Palma, y después, progresivamente, continuaría por La Gomera, Tenerife, Gran Canaria, Fuerteventura y Lanzarote. Inicialmente no se preveían vientos de gran intensidad en las zonas de costa y de niveles bajos, aunque sí podrían soplar con cierta fuerza en las medianías y cumbres.

La Agencia Estatal de Meteorología decretó aviso amarillo ante probabilidad de lluvias acumuladas en una hora de 60 mm, principalmente en las islas occidentales y en Gran Canaria.

La previsión facilitada por la Agencia Estatal de Meteorología genera que la Dirección General de Seguridad y Emergencias (DGSE), en base al PEFMA, comience a decretar las diferentes situaciones que se van generando en virtud de la información que se recibe y de las predicciones a corto plazo, así como de las consecuencias que se van produciendo.

Ante la predicción recibida por el CECOES 1-1-2 desde el grupo de predicción y vigilancia de Canarias de la AEMET, el día 29 de enero, la DGSE declara situación de alerta por fenómenos localmente tormentosos e intensos, en las islas occidentales. Asimismo, la DGSE procede a declarar la situación de prealerta en la isla de Gran Canaria por posibilidades de precipitaciones acumuladas en 12 horas de 60 mm.

Posteriormente, y tras recibir la predicción correspondiente, sobre las 18:30 horas, la DGSE realiza actualización de la alerta, afectando a la isla de Gran Canaria, además de las islas occidentales por lluvias.

El 30 de noviembre, la Dirección General de Seguridad y Emergencias en base a la información facilitada por el grupo de predicción y vigilancia de Canarias de la AEMET, declara la finalización de la situación de alerta en las islas occidentales y el

mantenimiento de la situación de prealerta en las islas occidentales y la isla de Gran Canaria.

Ese mismo día, sobre las 09:00 horas y tras recibir predicción de la AEMET, la DGSE declara la finalización de la situación de prealerta por lluvias para las islas de La Palma, La Gomera y Tenerife. Además procede a realizar actualización de la situación de prealerta por lluvias en las islas de Gran Canaria y El Hierro.

Posteriormente, y tras recibir la predicción correspondiente, el día 31 de enero, la DGSE decreta la finalización de la situación de prealerta por lluvias en las islas de Gran Canaria y El Hierro.

El CECOES 1-1-2 registró numerosos incidentes relacionados con carreteras cortadas, árboles caídos en la vía pública, caída de cascotes desde edificios, cables desprendidos, etc. Se registraron numerosas llamadas por derrumbes de piedras y muros en el norte de Tenerife y La Gomera, caída de muros y piedras en la zona de Bajamar y La Laguna, además del derrumbe de un muro en Arafo. También se registraron incidentes en la zona de Anaga, donde las lluvias provocaron varios desprendimientos en lugares como el acceso al pueblo de Taganana, en la costa de Benijo o en una parte del barrio de La Alegría.

Aunque las incidencias fueron generalizadas en todas las islas del archipiélago, la isla de Gran Canaria registró el mayor número de incidencias, principalmente en la ciudad de Las Palmas de GC y los municipios de medianías.

Entre las principales incidencias destacan los desprendimientos en la circunvalación de capital, a la altura de Lomo Blanco, donde se tuvo que cerrar parcialmente la circulación a un carril. En la GC-3, a la altura de Tamaraceite, una gran bolsa de agua acumulada impidió durante cierto tiempo el tráfico. Asimismo, se produjeron desprendimientos en el barranquillo de Don Zoilo y el gran caudal de agua del barranquillo del Zurbarán provocó numerosos destrozos en la vía de acceso a Tafira.

En el desarrollo de un fenómeno meteorológico adverso se suceden numerosas declaraciones, actualizaciones y finalizaciones de las distintas situaciones y fases que en ocasiones puedan dar lugar a equívocos o generar dudas, tanto entre la población como entre los recursos intervinientes. Durante el FMA descrito se registraron las siguientes:

Declaraciones de prealertas, alertas y actualizaciones hechas por la DGSE en base a las predicciones de la AEMET	Fecha de envío a recursos	Fenómeno meteorológico
Se recibe parte de AEMET y se declara ALERTA a partir del día 29/01/2011	29/01/2011 11:55	Fenómenos localmente tormentosos e intensos en las islas occidentales.
Se recibe parte de AEMET y se declara PREALERTA a partir del día 29/01/2011	29/01/2011 11:55	Lluvias en la isla de Gran Canaria.
Se recibe parte de AEMET y se declara actualización ALERTA a partir del día 29/11/2011	29/01/2011 18:30	Lluvias en las islas occidentales e isla de Gran Canaria.
Se recibe parte de AEMET y se declara la finalización de la situación de ALERTA y mantenimiento de PREALERTA a partir del día 30/01/2011	30/01/2011 00:00	Lluvias en las islas occidentales e isla de Gran Canaria.
Se recibe parte de AEMET y se declara la finalización de la situación de PREALERTA a partir del día 31/01/2011	31/01/2011 08:45	Lluvias islas occidentales.

Se activaron los Planes de Emergencia Insulares de Protección Civil de la isla de El Hierro y Tenerife, además de los municipales, integrándose todos en el PEFMA desde el punto de vista organizativo y operativo. El mando y dirección de las operaciones correspondió al director del PEFMA. Los valores que manejaba el grupo de predicción y vigilancia de Canarias de la AEMET para las islas occidentales eran precipitaciones acumuladas de 60 mm en 12 horas. Además, se preveía las mismas probabilidades de precipitación para la isla de Gran Canaria, que podrían afectar principalmente a las zonas de medianías.

Analizando los datos facilitados por la Agencia Estatal de Meteorología durante el fenómeno meteorológico adverso se registraron precipitaciones acumuladas de 104 mm en el Helipuerto del Pinar, 73 mm en Candelaria, 71.4 mm en Santa Cruz de Tenerife y 65.6 mm en Jinamar.

La emisión de estos boletines son fundamentales para el seguimiento y evaluación de los fenómenos meteorológicos adversos por parte de los servicios públicos de Seguridad y Emergencias, ya que además de reportar la información necesaria para decretar las diferentes situaciones y fases del PEFMA, posibilitan tomar las medidas preventivas por

parte de las distintas administraciones, como pueden ser los Cabildos, Ayuntamientos, servicios de Extinción y Salvamento, de Seguridad, etc.

Actividad generada por el fenómeno meteorológico en el CECOES 1-1-2

La principal actividad registrada durante el fenómeno meteorológico adverso descrito acaeció el día 30 de enero. Los datos más destacados son los siguientes:

Actividad registrada correspondiente a la Provincia de Las Palmas:

DEMANDAS	LPA (día normal)	LPA (30/01/2011)	INCREMENTO
Demandas atendidas	1.193	1.890	58,42%
Incidentes	834	1.309	56,95%
Sanidad	470	400	-14,89%
Seguridad Ciudadana	243	365	50,21%
Asistencia Técnica	40	458	1045,00%
Incendios	9	11	22,22%

Incrementos con respecto a la actividad normal en la afectación de incidentes, en los municipios de la Provincia de Las Palmas, relacionados con actuaciones de los servicios de extinción, salvamento y rescate durante el FMA, principalmente referidos a actuaciones de asistencias técnicas, suministro eléctrico, caída de árboles, derrumbes, afectación a carreteras, etc.

Nombre Municipio	%
Agüimes	1,09%
Antigua	0,22%
Arrecife	0,66%
Arucas	12,88%
Firgas	1,75%
Gáldar	1,97%
Ingenio	1,53%
Mogán	0,66%
Moya	0,66%
La Oliva	0,22%
Las Palmas	53,06%
Puerto Rosario	0,66%
San Bartolomé Lanzarote	0,22%
San Bartolomé Tirajana	0,44%

Actividad registrada correspondiente a la Provincia de Santa Cruz de Tenerife:

DEMANDAS	TFE (día normal)	TFE (30/01/2011)	INCREMENTO
Demandas atendidas	952	1.309	37,50%
Incidentes	618	652	5,50%
Sanidad	263	301	14,45%
Seguridad Ciudadana	256	241	-5,86%
Asistencia Técnica	28	50	78,57%
Incendios	12	9	-25,00%
Accidentes	59	51	-13,56%
Salvamento Marítimo	0	0	0%

Incrementos con respecto a la actividad normal en la afectación de incidentes, en los municipios de la Provincia de Santa Cruz de Tenerife, relacionados con actuaciones de los servicios de extinción, salvamento y rescate durante el FMA, relacionados principalmente con asistencias técnicas, suministro eléctrico, caída de árboles, derrumbes, afectación a carreteras, etc.

Nombre Municipio	Cantidad	%
Adeje	1	2,00%
Arico	1	2,00%
Arona	3	6,00%
Candelaria	2	4,00%
Garachico	1	2,00%
La Guancha	1	2,00%
Guia de Isora	1	2,00%
Güímar	1	2,00%
Icodde los Vinos	1	2,00%
Laguna La	10	20,00%
Los Llanos de Aridane	2	4,00%
La Orotava	3	6,00%
Puerto de la Cruz	4	8,00%
Realejos Los	1	2,00%
Rosario El	2	4,00%
San Miguel	1	2,00%
Santa Cruz de La Palma	1	2,00%
Santa Cruz de Tenerife	13	26,00%
Tacoronte	1	2,00%
TOTAL	50	100,00%

Resumen de la actividad registrada relacionada con el fenómeno meteorológico adverso en el ámbito de la Comunidad Autónoma de Canarias:

DEMANDAS	CAN (día normal)	CAN (30/01/2011)	INCREMENTO
Demandas atendidas	2.145	3.199	49,14%
Incidentes	1.452	1.961	35,06%
Sanidad	733	701	-4,37%
Seguridad Ciudadana	499	606	21,44%
Asistencia Técnica	68	508	647,06%
Incendios	21	20	-4,76%
Accidentes	129	125	-3,10%
Salvamento Marítimo	2	1	-50,00%