



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA, TECNOLOGÍA DE

COMPUTADORAS Y PROYECTOS

**DOCTORADO EN ENERGÍAS RENOVABLES:
BÚSQUEDA Y EVALUACIÓN DE EMPLAZAMIENTOS
ÓPTIMOS PARA ALBERGAR INSTALACIONES DE
ENERGÍAS RENOVABLES EN LA COSTA DE LA
REGIÓN DE MURCIA: COMBINACIÓN DE SISTEMAS
DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)
Y SOFT COMPUTING**

Tesis Doctoral presentada por

Juan Miguel Sánchez Lozano (Universidad Politécnica de Cartagena)

Dirigida por los Profesores Doctores:

M^a del Socorro García Cascales (Universidad Politécnica de Cartagena)

M^a Teresa Lamata Jiménez (Universidad de Granada)

Cartagena 2012







AGRADECIMIENTOS

En el transcurso de esta Tesis Doctoral han intervenido muchos compañeros de viaje cuya aportación e inestimable ayuda, han hecho posible su culminación.

En primer lugar mi agradecimiento a M^a del Socorro García Cascales (Chocky), este trabajo nace de ella, sin su confianza y apoyo incondicional en los momentos más delicados no hubiera podido superar los escollos que he encontrado en el camino. No sólo ha sido mi guía científica durante el desarrollo de esta investigación, sino que además, ha demostrado ser una excelente consejera, en definitiva, una amiga.

A M^a Teresa Lamata Jiménez (Maite), su incuestionable experiencia y extraordinaria capacidad de análisis han logrado escudriñar al máximo cada uno de los capítulos desarrollados en este trabajo.

No puedo olvidar a todos aquellos que me han ayudado de manera desinteresada: Antonio Urbina, José Ramón García Cascales, Antonio Sánchez Kaiser, Nieves Espinosa, Rafael García Valverde y Domingo Meca, gracias por haberme soportado en más de una ocasión con mis cuestionarios y peticiones.

Finalmente a mi familia y sobre todo a mi esposa Olga, que me ha aportado la energía, la confianza y el ánimo que me han faltado en muchos momentos de este largo camino.

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

RESUMEN

Las instalaciones de energías renovables (EERR), impulsadas inicialmente por un marco legislativo favorable, por la necesidad de disminuir la dependencia energética de combustibles fósiles y, posteriormente por una evolución progresiva extraordinaria, han experimentado una creciente expansión y desarrollo en el sector energético español en las últimas décadas.

La búsqueda y selección de emplazamientos óptimos para implantar instalaciones de EERR, no sólo requiere disponer de un grupo de asesoramiento capaz de evaluar y analizar las diferentes alternativas, sino que resulta conveniente aplicar un conjunto de herramientas y métodos que faciliten el proceso de tomas de decisiones. El problema de localización de instalaciones de energías renovables es un problema complejo, dado que se necesitan manejar gran variedad de criterios de distinta índole y procedencia, así como evaluar en la mayoría de los casos un gran número de alternativas. Para ello, los métodos de decisión multicriterio constituyen la metodología principal para abordar este problema combinándolos por un lado con los Sistemas de Información Geográfica que, nos servirán de soporte de base de datos a nuestra problema y por otro con las herramientas de Soft Computing aplicadas en las propias metodologías de decisión que, les confieren a éstas el modelado de la incertidumbre y la vaguedad de los datos que se manejan en este tipo de problemas.

En particular y como ejemplo de aplicación, en la presente investigación se propone la combinación de distintas metodologías de decisión multicriterio con Sistemas de Información Geográfica como soporte de base de datos, y el Soft Computing y en concreto la lógica difusa con el objetivo de evaluar y clasificar los emplazamientos óptimos de instalaciones de EERR en la costa de la Región de Murcia.

ABSTRACT

Renewable energy facilities, initially driven by a favourable legislative framework due to the need to reduce energy dependence on fossil fuels and later by a progressive extraordinary evolution, have experienced an increasing expansion and development in the Spanish energy sector in recent decades.

The search and selection of optimal locations to implant renewable energy facilities, requires not only to have an advisory group able to assess and analyze alternatives, but it is appropriate to apply a set of tools and methods to facilitate the decision making process. The locating problem of renewable energy facilities is a complex problem because it needs to handle a great variety of criteria with different nature and origin, as well as to evaluate, in most cases, a large number of alternatives. For this, multicriteria decision methods are the main methods to tackle this problem by combining them, on the one hand with Geographic Information Systems that will be used as support database to our problem, and on the other hand, with Soft Computing tools applied in the own decision methodologies which give them the uncertainty modeling and vagueness of the data used in this type of problems.

In particular and as an example of application, in this investigation the combination of multicriteria decision methods with Geographic Information Systems is proposed as support database, and Soft Computing (specifically the Fuzzy Logic) for the search and evaluation of optimal locations to implant renewable energy facilities on the coast of the Region of Murcia.





UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA, TECNOLOGÍA DE

COMPUTADORAS Y PROYECTOS

SUMMARY OF THE DOCTORAL THESIS:

**SEARCH AND EVALUATION OF OPTIMAL SITES TO
IMPLANT RENEWABLE ENERGIES FACILITIES,
COMBINATION OF GEOGRAPHIC INFORMATION
SYSTEMS (GIS) AND SOFT COMPUTING: CASE
STUDY OF THE COAST OF THE REGION OF MURCIA**

Autor: Juan Miguel Sánchez Lozano





SUMMARY

1.1. Approach to the subject of study and interest

1.1.1. Introduction

The current energy model is, for its experience and maturity, a consistently reliable choice, however its implementation is closely related to the cost of its generation and to the increase of waste produced. Therefore, it seems reasonable to make an effort to study and to evaluate possible energy alternatives that reduce the negative aspects of current technologies (Panwar et al, 2011).

Thus in recent years the development and establishment of renewable energy facilities has been encouraged as a viable option. Among the various issues to consider when this type of facility is implanted, the location of the plant stands out above the rest because the investment required to undertake any such installation is of such magnitude that small errors of planning can cause serious damage both economically as well as environmentally, which may even lead to the closure of the activity.

Often the choice and location of the facility to implant fail to obey to objective criteria derived from correct advice and normally the objective of achieving an optimal use entails a certain degree of uncertainty which, in most instances, could be avoided.

For projects in renewable energy facilities, as in any engineering project, decision making is an intellectual activity that is necessary and essential to handle (Lee, A.H.I. et al, 2009). Before taking any decision, the facts, the knowledge and experience must be collected to assess in the context of the problem. Although the promoter of the facility will usually be the primary decision maker, sometimes he does not have the necessary knowledge and information. Thus to make the decision he requires the help of an advisory group consisting of experienced personnel from various fields or areas of knowledge.



Determining the optimal location of these facilities involves a number of criteria that exert an influence, with varying degrees, on the decision making process so that, among the various decision-making methods existing in the current scenario, for these specific location problems, it is ideal to use *multicriteria decision methods*.

Similarly, it is quite common that the criteria that influence the location of renewable energy facilities present a different nature, with quantitative criteria and qualitative criteria coexisting. Therefore, it is necessary to use a combination of theories (San Cristobal, J.R., 2011) and methodologies to exploit the tolerance which involves imprecision and uncertainty to achieve tractability, robustness and low cost solutions. This combination is called *Soft Computing* and among its many tools to solve decision problems with criteria of different nature, it is inevitable to use *Fuzzy Logic* (Zadeh, L.A., 1965) because when the problem involves data that represent some kind of vagueness or uncertainty, the modeling language is represented as an appropriate methodology based on Fuzzy Set Theory. Such ingredients are presented as valuable tools to help the decision maker during this decision making process.

Moreover, the decision group not only apply their knowledge and experience in decision support systems (Haralambopoulos and Polatidis, 2003), but it will be convenient to use most of the available tools because when methodologies such as methods of multicriteria decision are applied to environmental problems (Chang, N.B. et al, 2009), spatial planning, site optimization, etc. large amounts of spatial information need to be managed. In order to use this information in a reliable and effective way, the decision group needs to employ a set of tools that stand out from the rest: *Geographic Information Systems (GIS)*. These systems allow to operate alone and in conjunction with the most diverse variables, considered spatially. This form of geographic information management favours multicriteria analysis, given the possibility of combining and assessing the criteria simultaneously (the basis for decision making) with their factors (the aspects that strengthen or weaken them) through the management of their attributes (the variables) within certain decision and valuation rules. Therefore, GIS are essential for this task, and they can be used to develop very flexible tools for



decision support, applicable to problems such as determining the optimal locations for renewable energy facilities (Janke, J.R., 2010).

Therefore, for the problem of locating renewable energy facilities, the combination of GIS with Soft Computing is critical because, while the GIS has been recognized as a powerful instrument with unique capabilities to store, manipulate, analyze and display spatial data for decision making, Soft Computing provides a rich collection of procedures and algorithms for structuring decision problems, design, evaluation and prioritization of alternatives.

1.1.2. Main purpose of the research

The *main purpose* of this research is to solve a location problem, specifically in finding and evaluating optimal locations to contain renewable energy facilities on the coast of the Region of Murcia. For this purpose, it is demonstrated how GIS can be combined with Soft Computing using fuzzy logic and multicriteria decision methods.

1.2. Research objectives

The objective of this research is to use Geographic Information Systems (GIS) as database and Soft Computing as a calculation tool in order to optimize the locations to implant renewable energy facilities (wind energy, solar photovoltaic energy and solar thermal with high temperature or solar thermoelectric energy) on the coast of the Region of Murcia.

To achieve this general objective, a number of specific objectives are posed, which are summarized below:

The first objective consists of, by applying GIS with thematic layers, selecting the suitable surfaces to contain the renewable energy facilities mentioned, since it requires not only to have the necessary geographic information, but also needs to go further within the legislative framework of the study area in order to make appropriate treatment and processing of such information.



Another specific objective of this study will be to determine the weight or coefficient of importance of the criteria defined by different thematic layers. As there are different criteria involved in the decision and they are also characterized by hierarchical structures, among the various existing multicriteria decision methods in the current scenario to determine the importance or weighting of the criteria the Analytic Hierarchy Process (AHP) methodology proposed by Saaty in 1980 shall be employed. To achieve this goal and, as a result of the fact that the criteria are of different nature (qualitative and quantitative) fuzzy linguistic modeling will also be used.

To achieve the global objective involves the evaluation of a large number of alternatives for each of the renewable technologies so that this overall objective is achieved using a simple, efficient and appropriate calculation process to the conditions (different criteria nature and a large number of alternatives to evaluate), therefore, we will use the multicriteria decision method called TOPSIS (Hwan and Yoon, 1981) and its variant for fuzzy numbers (fuzzy TOPSIS).

Finally, in order to check the validity of the methodologies used, a comparison process of multicriteria decision methodologies will be carried out and in which the methodology used is compared with another currently widespread multicriteria method called ELECTRE-TRI (Roy and Bouyssou, 1991).

1.3. Work structure

The present memory of Thesis is divided into nine chapters which are grouped into four parts (fundamentals, methodology, analysis and results); these have been listed in a logical distribution according to how the research has been developed.

After the **introduction**, which sets out the interest of the investigation and the objectives it pursues, the main parts which the work relies on are developed. The **first part**, which includes the theoretical foundations of the work, consists of a review of the mayor contributions made in the field of study from the perspective of renewable energy, geographic information systems and decision making. The **second part** describes the methodology, which describes the Soft Computing techniques to be used and the multicriteria decision methods to be applied in order to assess and classify the



different alternatives. The **third part** proceeds with the analysis of the particular case described, for this the suitable areas to implant renewable energy facilities are selected and the optimal locations are assessed according to the decision support techniques previously indicated. In the **fourth part**, the results and conclusions, and labour constraints are presented. Future research lines that are opened following the contributions made are also established.

Finally, in addition to the index of figures and tables, there is a section of appendices where the questionnaires to experts who have been required to conduct this research are listed.

The content of each chapter is summarized below:

In the **introductory chapter** the field of study is expounded, which is limited to the analysis to be performed, detailing the interest and justification of the topic under study, the main objectives to be achieved, and the structure of the Thesis.

The **second chapter** presents the general theoretical framework of renewable energies, indicating the current and future situation of both the energy sector and the electricity sector. The current situation of renewable energies in the Region of Murcia will be dealt with in greater detail, with a focus on wind energy, solar photovoltaic energy and solar thermal energy with high temperature (thermoelectric solar energy).

The **third chapter** is specifically dedicated to the representation, structure and organization of Geographic Information Systems (GIS) and describes the general characteristics, origin and components that form them. Subsequently the GIS software used will be focused on, discussing its election and highlighting its multiple tools from those that will be used in the subsequent analysis.

In the **fourth chapter**, the theoretical framework of the decision making and Soft Computing is described, since it will be centred on basic concepts in order to classify the various decision problems and to define both phases that structure them, and the various existing decision schools. At the end of the chapter, special mention will be made to studies and reports published to date in decision making processes in the field of renewable energies and GIS.



In the **fifth chapter**, the methodology that is used in the development of research will be defined; those methods and multicriteria decision techniques to be applied for the evaluation of the alternatives to be analyzed are detailed and, a decision software that will be used for subsequent classification will be described.

In the **sixth chapter**, after defining the theoretical concepts and reviewing the main contributions on renewable energies, GIS, and Soft Computing, the analysis stage is undertaken, which is divided into two phases, the first is defined in this chapter and it consists of introducing the cartographic information as thematic layers in the GIS software, indicating both its provenance and the process of adaptation that has been carried out. The aim of this chapter is to select suitable surfaces of the study area to implant renewable energies facilities.

The **seventh chapter**, contains the second phase of the analysis stage, this will start by defining the criteria that influence the decision and the creation of the final thematic layers using GIS software, which will contain all aggregated factors (criteria and alternatives). The decision rule will be executed after having previously obtained and analyzed the weights of the criteria and subsequently, assessing and classifying all the alternatives i.e., the optimal sites.

In the **eighth chapter** the results obtained in the evaluation of alternatives for each of the different renewable energy technologies are presented. In order to verify the results obtained and give greater consistency to the methodology, this chapter ends with a model validation process.

Finally, the **ninth chapter** closes the investigation, gathering together the conclusions drawn from the state of the art and the main conclusions concerning both methodological contributions and the application of this Thesis. This chapter concludes by proposing future research to follow in later works, without forgetting the limitations of the research.

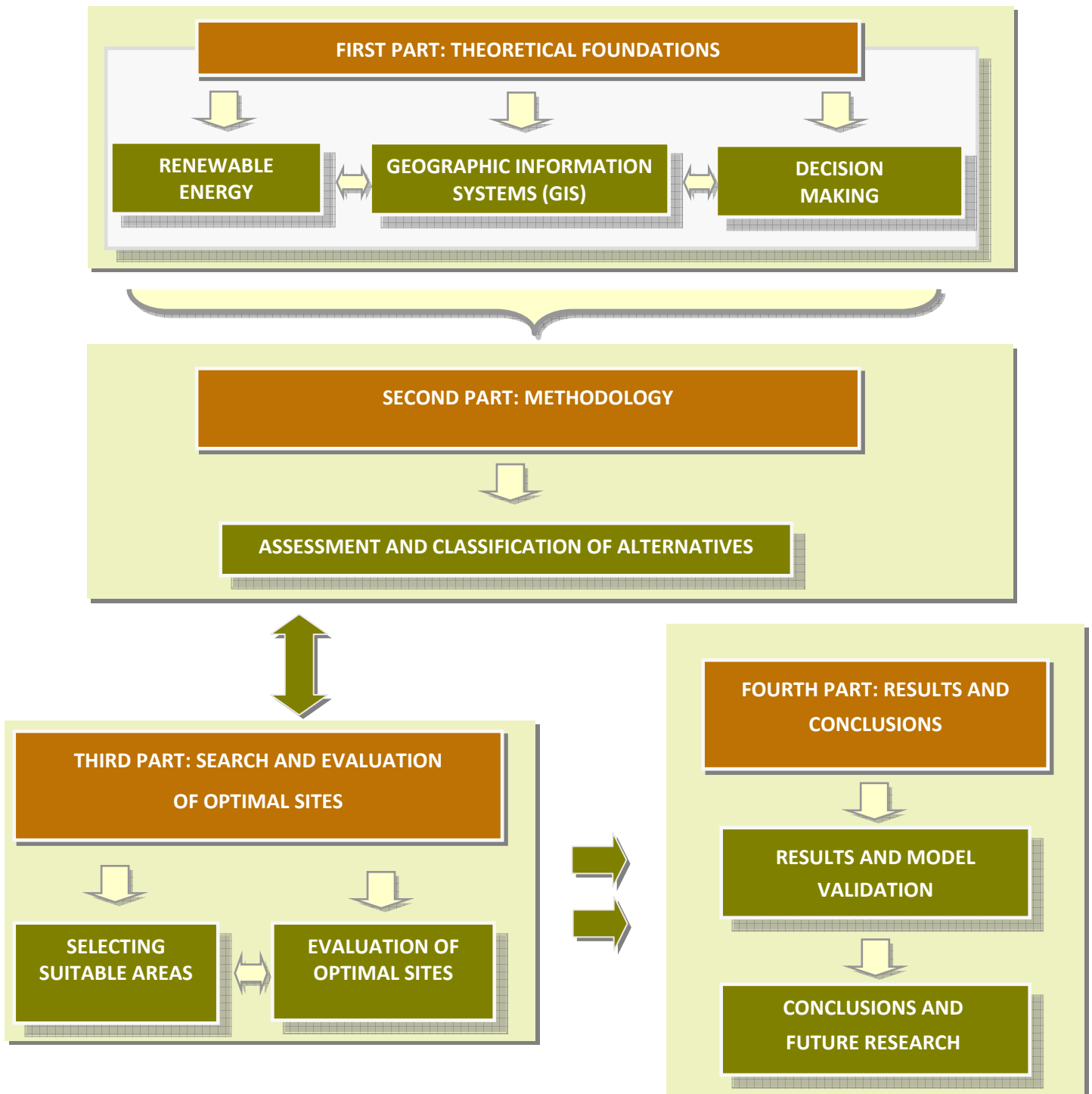


Fig. 1.1.- Work structure







ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPITULO I.- INTRODUCCION

	<i>Pág.</i>
1.1. Acercamiento al tema objeto de estudio y su interés	I-2
1.1.1. Introducción	I-2
1.1.2. Finalidad principal de la investigación	I-4
1.2. Objetivos de la investigación	I-5
1.3. La estructura del trabajo	I-6
1.4. Referencias bibliográficas del Capítulo I	I-10

PRIMERA PARTE.- FUNDAMENTOS TEORICOS

CAPITULO II.- MARCO TEORICO GENERAL. ENERGIAS RENOVABLES

	<i>Pág.</i>
2.1. Energías Renovables. Situación actual y futura.	II-2
2.1.1. Situación del sector energético.	II-2
2.1.2. Situación del sector eléctrico.	II-6
2.1.3. Instalaciones de EERR. Conceptos generales	II-9
2.1.3.1. Biomasa, biogás y biocombustibles	II-9
2.1.3.2. Energía hidráulica	II-11
2.1.3.3. Energía solar fotovoltaica.	II-12
2.1.3.4. Energía solar térmica de baja temperatura	II-13
2.1.3.5. Energía solar de alta temperatura con conexión a red (Termoeléctrica)	II-14
2.1.3.6. Energía de los mares y océanos	II-15
2.1.3.7. Energía geotérmica	II-16
2.1.3.8. Energía eólica.	II-16



	<i>Pág.</i>
2.1.4. Problemática de la localización de instalaciones de EERR	II-17
2.1.5. EERR en la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia (CARM)	II-20
2.1.5.1. Marco legislativo.	II-20
2.1.5.2. EERR en la CARM destinadas a la generación de energía eléctrica	II-21
2.1.5.3. Estado actual y perspectivas futuras	II-23
2.1.6. Caso de estudio: Localización de instalaciones de energías renovables en el Litoral de la Región de Murcia	II-31
2.1.6.1. ¿Qué instalaciones de EERR serán objeto de estudio? ¿Por qué?	II-31
2.1.6.2. ¿Cuál será la zona objeto de estudio?	II-34
2.2. Referencias bibliográficas del Capítulo II	II-35

CAPITULO III.- SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

	<i>Pág.</i>
3.1. Sistemas de Información Geográfica. Introducción y objetivos	III-2
3.1.1. Concepto general.	III-2
3.1.2. Origen de los SIG.	III-4
3.1.3. Componentes básicos de los SIG.	III-7
3.1.4. La información geográfica.	III-8
3.1.4.1. La representación cartográfica de la información geográfica.	III-9
3.1.4.1.1. La cartografía: fuente básica de la información geográfica	III-9
3.1.4.1.2. Los mapas	III-12
3.1.4.2. La estructura de la información geográfica.	III-14
3.1.4.2.1. El modelo raster	III-14
3.1.4.2.2. El modelo vectorial	III-16
3.1.4.2.3. ¿Qué modelo utilizar?	III-17
3.1.4.2.4. El concepto de capa.	III-17
3.1.4.3. La organización de la información geográfica. Las bases de datos	III-19



	<i>Pág.</i>
3.1.4.3.1. Las bases de datos: concepto, evolución y tipos	III-19
3.1.4.3.2. La estructura de datos en el modelo raster	III-22
3.1.4.3.3. La estructura de datos en el modelo vectorial	III-24
3.1.4.4. La obtención de la información geográfica	III-26
3.1.4.5. Los errores relacionados con la información geográfica	III-28
3.1.5. Los SIG en Energías Renovables.	III-29
3.2. Software gvSIG.	III-31
3.2.1. ¿Por qué gvSIG?	III-31
3.2.2. Manejo de la aplicación	III-33
3.2.2.1. Vistas.	III-33
3.2.2.1.1. Edición	III-35
3.2.2.1.2. Geoprocesamiento	III-36
3.2.2.2. Tablas	III-40
3.2.2.3. Mapas	III-42
3.2.2.4. Extensiones	III-43
3.2.2.4.1. Sextante	III-43
3.3. Referencias bibliográficas del Capítulo III	III-47



SEGUNDA PARTE.-METODOLOGÍA

CAPÍTULO IV.- TOMA DE DECISIONES Y SOFT COMPUTING

	<i>Pág.</i>
4.1. La toma de decisiones	IV-2
4.1.1. Introducción	IV-2
4.1.2. Proceso de toma de decisión multicriterio	IV-3
4.1.3. Referencias históricas sobre la decisión multicriterio	IV-5
4.1.3.1. La escuela americana	IV-6
4.1.3.2. La escuela europea	IV-9
4.2. Soft Computing	IV-10
4.2.1. La lógica difusa	IV-12
4.2.1.1. Conjunto difuso	IV-12
4.2.1.2. Tipos de funciones de pertenencia	IV-13
4.2.1.3. Números difusos	IV-15
4.2.1.4. Operaciones con números difusos	IV-19
4.2.1.5. Ordenación de números difusos	IV-20
4.2.1.5.1. Proceso de ordenación de García-Cáscales y Lamata	IV-20
4.2.2. Semántica del conjunto de términos lingüísticos	IV-21
4.3. La toma de decisiones y Soft Computing en EERR	IV-23
4.4. Referencias bibliográficas del Capítulo IV	IV-31

CAPÍTULO V.- EVALUACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE ALTERNATIVAS

	<i>Pág.</i>
5.1. Introducción	V-2
5.2. El Proceso Analítico Jerárquico (AHP)	V-3
5.2.1. Pasos del método AHP	V-3



	<i>Pág.</i>
5.2.2. Ventajas e inconvenientes del AHP	V-9
5.2.3. AHP en grupo	V-10
5.2.4. AHP difuso	V-11
5.3. El Método TOPSIS	V-11
5.3.1. Introducción	V-11
5.3.2. El método	V-12
5.3.3. Algoritmo del método TOPSIS	V-13
5.3.4. El método TOPSIS difuso	V-16
5.3.4.1. Algoritmo del método TOPSIS difuso	V-16
5.4. El Método ELECTRE-TRI	V-19
5.4.1. Principio del método	V-19
5.4.2. Desarrollo del método	V-19
5.4.2.1. Definición de acciones de referencia	V-20
5.4.2.2. Índices de concordancia	V-21
5.4.2.2.1. Índices de concordancia por criterio	V-21
5.4.2.2.2. Índice de concordancia global	V-22
5.4.2.3. Índices de discordancia por criterio	V-22
5.4.2.4. Grado de credibilidad	V-23
5.4.2.5. Relación de superación o sobreclasificación	V-24
5.4.2.6. Procedimientos de asignación	V-24
5.5. Software IRIS	V-25
5.5.1. Introducción	V-25
5.5.2. Entrada de datos	V-26
5.5.3. Salida de resultados	V-29
5.6. Aplicación de la metodología descrita al caso de estudio	V-31
5.7. Referencias bibliográficas del Capítulo V	V-31



TERCERA PARTE.- BÚSQUEDA Y EVALUACIÓN DE EMPLAZAMIENTOS ÓPTIMOS PARA ALBERGAR INSTALACIONES DE ENERGÍAS RENOVABLES EN LA COSTA DE LA REGIÓN DE MURCIA

CAPITULO VI.- SELECCIÓN DE LAS SUPERFICIES APTAS PARA ALBERGAR INSTALACIONES DE ENERGÍAS RENOVABLES

	<i>Pág.</i>
6.1. Introducción	VI-2
6.1.1. Descripción de la metodología	VI-2
6.2. Zona de estudio	VI-4
6.3. Marco legal: Normativa	VI-6
6.4. Capas temáticas. Procedencia y Adecuación	VI-8
6.4.1. Procedencia de capas temáticas	VI-8
6.4.2. Adecuación de capas temáticas	VI-9
6.4.2.1. Capa de límites municipales de la Región de Murcia	VI-10
6.4.2.2. Capa de sistemas generales	VI-11
6.4.2.2.1. Capa de suelos urbanos y no urbanos con protección especial	VI-11
6.4.2.2.2. Capa de áreas de alto valor paisajístico, equipamientos, sistemas generales hidráulicos y vías pecuarias	VI-13
6.4.2.2.3. Capa de carreteras y red de ferrocarril	VI-14
6.4.2.3. Capa de cauces y ramblas	VI-16
6.4.2.4. Capa de patrimonio arqueológico, paleontológico y cultural	VI-17
6.4.2.5. Capa de montes y protección de costas	VI-18
6.4.2.6. Capa de Lugares de Importancia Comunitaria (LICs)	VI-20
6.4.2.7. Capa de Zonas de Especial Protección para Aves (ZEPAs)	VI-21
6.5. Aplicación de las restricciones	VI-22
6.6. Introducción de la información catastral	VI-24
6.7. Superficies aptas obtenidas en función de la tecnología renovable	VI-26
6.7.1. Energía solar fotovoltaica	VI-26
6.7.2. Energía solar térmica de alta temperatura (termoeléctrica)	VI-27



	<i>Pág.</i>
6.7.3. Energía eólica	VI-29
6.8. Análisis de los resultados obtenidos	VI-30
6.9. Referencias bibliográficas del Capítulo VI	VI-32

CAPITULO VII.- EVALUACION DE EMPLAZAMIENTOS ÓPTIMOS PARA ALBERGAR INSTALACIONES DE ENERGÍAS RENOVABLES

	<i>Pág.</i>
7.1. Definición del modelo de decisión	VII-2
7.1.1. Definición del objetivo.	VII-2
7.1.2. Definición de criterios y desarrollo de la base de datos	VII-3
7.1.2.1. Criterios medioambientales	VII-5
7.1.2.2. Criterios orográficos	VII-7
7.1.2.3. Criterios de localización	VII-9
7.1.2.4. Criterios climatológicos	VII-15
7.2. Construcción de la capa temática con los factores agregados.	VII-18
7.3. Ejecución de la regla de decisión	VII-22
7.3.1. Obtención del peso de los criterios mediante la metodología AHP	VII-22
7.3.1.1. Encuesta a expertos	VII-22
7.3.1.2. Configuración de datos	VII-24
7.3.1.3. Cálculo del peso de los criterios	VII-25
7.3.1.4. Resultado del peso de los criterios por experto	VII-26
7.3.1.5. Resultado del peso de los criterios por grupo de decisión (agregaciones homogéneas)	VII-28
7.3.1.6. Conclusiones de las valoraciones de criterios obtenidas	VII-32
7.3.2. Evaluación de las alternativas aplicando la metodología TOPSIS en gvSIG	VII-33
7.3.2.1. Definición de criterios para aplicar TOPSIS difuso	VII-34
7.3.2.2. Aplicación del método TOSIS difuso	VII-35



	<i>Pág.</i>
7.4. Selección de las mejores alternativas mediante gvSIG	VII-38
7.5. Comparación de metodologías multicriterio mediante evaluación de las 20 mejores alternativas: TOPSIS vs ELECTRE-TRI	VII-39
7.5.1. Selección de las 20 mejores alternativas	VII-39
7.5.2. Clasificación de las mejores alternativas aplicando TOPSIS	VII-40
7.5.3. Clasificación de las mejores alternativas aplicando la metodología ELECTRE-TRI en software IRIS	VII-43
7.5.3.1. Entrada de datos en IRIS	VII-43
7.6. Referencias bibliográficas del Capítulo VII	VII-47

CUARTA PARTE.- RESULTADOS, CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS DE INVESTIGACION

CAPITULO VIII.- RESULTADOS

	<i>Pág.</i>
8.1. Introducción	VIII-2
8.2. Selección de emplazamientos óptimos de instalaciones de EERR con gvSIG	VIII-3
8.2.1. Emplazamientos óptimos de instalaciones solares fotovoltaicas	VIII-3
8.2.2. Emplazamientos óptimos de instalaciones solares termoeléctricas	VIII-8
8.2.3. Emplazamientos óptimos de parques eólicos	VIII-12
8.3. Evaluación de las alternativas aplicando el método TOPSIS difuso	VIII-18
8.3.1. Evaluación de las alternativas para albergar instalaciones solares fotovoltaicas	VIII-18
8.3.2. Evaluación de las alternativas para albergar instalaciones solares termoeléctricas	VIII-21
8.3.3. Evaluación de las alternativas para albergar parques eólicos	VIII-24
8.3.4. Análisis y estudio de los resultados obtenidos mediante la metodología TOPSIS difusa y su visualización en gvSIG	VIII-27
8.4. Evaluación, clasificación y comparación de las mejores alternativas mediante los métodos TOPSIS difuso y clásico y ELECTRE-TRI	VIII-29



	<i>Pág.</i>
8.4.1. Evaluación mediante TOPSIS difuso y TOPSIS clásico	VIII-29
8.4.1.1. Evaluación de los 20 mejores emplazamientos de instalaciones solares fotovoltaicas	VIII-29
8.4.1.2. Evaluación de los 20 mejores emplazamientos de instalaciones solares termoeléctricas	VIII-33
8.4.1.3. Evaluación de los 20 mejores emplazamientos de parques eólicos	VIII-35
8.4.2. Clasificación mediante ELECTRE-TRI	VIII-38
8.4.2.1. Clasificación de los 20 mejores emplazamientos de instalaciones solares fotovoltaicas	VIII-38
8.4.2.2. Clasificación de los 20 mejores emplazamientos de instalaciones solares termoeléctricas	VIII-41
8.4.2.3. Clasificación de los 20 mejores emplazamientos de parques eólicos	VIII-42
8.4.3. Comparación entre métodos de decisión multicriterio: TOPSIS clásico, TOPSIS difuso y ELECTRE-TRI	VIII-44
8.4.3.1. Comparación con los 20 mejores emplazamientos de instalaciones solares fotovoltaicas	VIII-44
8.4.3.2. Comparación con los 20 mejores emplazamientos de instalaciones solares termoeléctricas	VIII-46
8.4.3.3. Comparación con los 20 mejores emplazamientos de parques eólicos	VIII-47
8.5. Conclusiones de los resultados obtenidos	VIII-49

CAPITULO IX.- CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS DE INVESTIGACION

	<i>Pág.</i>
9.1. Introducción	IX-2
9.2. Conclusiones	IX-3
9.2.1. Conclusiones correspondientes al estado del arte	IX-3
9.2.2. Conclusiones correspondientes a las aportaciones metodológicas	IX-3
9.2.3. Conclusiones correspondientes a la aplicación de la Tesis Doctoral	IX-4
9.3. Líneas futuras de investigación	IX-6



	<i>Pág.</i>
9.3.1. Recomendaciones para futuras investigaciones	IX-6
9.3.2. Futuras investigaciones en las aportaciones metodológicas	IX-7
9.3.3. Futuras investigaciones en las aplicaciones	IX-8

CHAPTER IX.- CONCLUSIONS AND FUTURE RESEARCH

	<i>Pág.</i>
9.1. Introduction	IX-2
9.2. Conclusions	IX-3
9.2.1. Findings for the state of art	IX-3
9.2.2. Determination for the methodological contributions	IX-3
9.2.3. Determination for the implementation of the Doctoral Thesis	IX-4
9.3. Future research	IX-6
9.3.1. Recommendations for future research	IX-6
9.3.2. Future research in the methodological contributions	IX-6
9.3.3. Future research in applications	IX-7

ANEXOS.- CUESTIONARIOS DE LA INVESTIGACIÓN

ANEXO I.- OBTENCIÓN DEL PESO DE LOS CRITERIOS

ANEXO II.- OBTENCIÓN DE LOS LÍMITES DE LAS CATEGORÍAS



LISTADO DE FIGURAS

Fig. 1.1.- Estructura del trabajo

Fig. 2.1.- Consumo final bruto de energía en 2010

Fig. 2.2.- Participación de las distintas fuentes de energía en la generación eléctrica

Fig. 2.3.- Producción eléctrica según MITyC/IDEA. Año 2009

Fig. 2.4.- Evolución prevista del coste de la electricidad en el periodo 2000-2020 producida para las tres tecnologías de CST

Fig. 2.5.- Potencia total instalada en la región de Murcia para diferentes EERR en 2007

Fig. 2.6.- Evolución de la energía vendida de fotovoltaica, eólica, hidroeléctrica y biogás en la Región de Murcia. Porcentaje de GWh sobre el total.

Fig. 2.7.- Mapa de distribuciones potenciales para biomasa en la Región de Murcia

Fig. 2.8.- Principales valores de radiación solar diaria expresados en kWh/m²

Fig. 2.9.- Localización de centrales solares termoeléctricas en España

Fig. 2.10.- Mapa de densidad de potencia eólica media anual (W/m²) a 80 metros de altura en la Región de Murcia

Fig. 3.1.- Mapa de incidencia de la cólera en el distrito de Soho

Fig. 3.2.- Cronología de la evolución de los SIG, en relación con los factores que propiciaron el cambio

Fig. 3.3.- Componentes de un SIG

Fig. 3.4.- Coordenadas terrestres

Fig. 3.5.- Desarrollo completo del cilindro en el meridiano 0°

Fig. 3.6.- Ejemplo de representación raster

Fig. 3.7.- Ejemplo de representación vectorial

Fig. 3.8.- Capas temáticas en un SIG

Fig. 3.9.- Estructura de base de datos jerárquica

Fig. 3.10.- Estructura de base de datos en red

Fig. 3.11.- Imagen raster de 4 filas y 5 columnas con valores temáticos 1, 2 y 3 organizada mediante enumeración exhaustiva

Fig. 3.12.- Imagen raster de 4 filas y 5 columnas con valores temáticos 1, 2 y 3 organizada mediante codificación “run length”

Fig. 3.13.- Representación de imagen raster de 5x5 mediante estructura jerárquica

Fig. 3.14.- Ejemplo de estructura de base de datos vectorial

Fig. 3.15.- Ejemplo de estructura vectorial de datos TIN



- Fig. 3.16.- Visualización del software gvSIG
- Fig. 3.17.- Herramientas de edición gráfica en gvSIG
- Fig. 3.18.- Esquema de funcionamiento del geoproceso Área de influencia
- Fig. 3.19.- Esquema de funcionamiento del geoproceso Enlace espacial
- Fig. 3.20.- Esquema de funcionamiento del geoproceso Recortar
- Fig. 3.21.- Esquema de funcionamiento del geoproceso Diferencia
- Fig. 3.22.- Esquema de funcionamiento del geoproceso Intersección
- Fig. 3.23.- Esquema de funcionamiento del geoproceso Unión
- Fig. 3.24.- Esquema de funcionamiento del geoproceso Geometría computacional
- Fig. 3.25.- Esquema de funcionamiento del geoproceso Agregación
- Fig. 3.26.- Esquema de funcionamiento del geoproceso Juntar
- Fig. 3.27.- Representación de una tabla de atributos en gvSIG
- Fig. 3.28.- Representación de un mapa de municipios en gvSIG
- Fig. 3.29.- Gestor de Herramientas de Sextante
- Fig. 4.1.- Esquema proceso de toma de decisión multicriterio
- Fig. 4.2.- Ejemplo de función de pertenencia de un conjunto difuso
- Fig. 4.3.- Función pertenencia triangular
- Fig. 4.4.- Función de pertenencia trapezoidal
- Fig. 4.5.- Función de pertenencia Gaussiana
- Fig. 4.6.- Ejemplos de números difusos
- Fig. 4.7.- Número difuso triangular con sus tres puntos fundamentales (a,b,c)
- Fig. 4.8.- Representación de $SL(A_i)$, $SM(A_i)$ y $SR(A_i)$
- Fig. 4.9.- Números difusos con función de pertenencia triangular
- Fig. 5.1.- Jerarquía proceso AHP
- Fig. 5.2.- Alternativa ideal vs alternativa no ideal
- Fig. 5.3.- Algoritmo del Método TOPSIS
- Fig. 5.4.- Definición de las categorías mediante límites de perfiles
- Fig. 5.5.- Construcción de un índice de concordancia
- Fig. 5.6.- Construcción de un índice de discordancia
- Fig. 5.7.- Relación de sobreclasificación (relación “outranking”)
- Fig. 5.8.- Página de acciones en IRIS
- Fig. 5.9.- Página de fijación de parámetros en IRIS



- Fig. 5.10.- Página de fijación de límites en IRIS
- Fig. 5.11.- Página de restricciones en IRIS
- Fig. 5.12.- Salida de resultados en IRIS
- Fig. 5.13.- Situación de inconsistencia en IRIS
- Fig. 6.1.- Proceso a seguir para la obtención de superficies aptas
- Fig. 6.2.- Litoral de la Región de Murcia
- Fig. 6.3.- Municipios del Litoral de la Región de Murcia
- Fig. 6.4.- Capa temática de suelos urbanos y no urbanos con protección especial
- Fig. 6.5.- Capa temática de Áreas de alto valor paisajístico / Equipamientos, sistemas generales hidráulicos y vías pecuarias
- Fig. 6.6.- Capa temática de Carreteras y Red Ferroviaria
- Fig. 6.7.- Capa temática de Cauces y Ramblas
- Fig. 6.8.- Capa temática de Patrimonio Arqueológico, Paleontológico y Cultural
- Fig. 6.9.- Capa temática de Protección costera y montes
- Fig. 6.10.- Capa temática de Lugares de Importancia Comunitaria (LICs)
- Fig. 6.11.- Capa temática de Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPAs)
- Fig. 6.12.- Diagrama de criterios restrictivos aplicados
- Fig. 6.13.- Diagrama de criterios restrictivos aplicados
- Fig. 6.14.- Capa temática de información catastral
- Fig. 6.15.- Superficie apta para implantar huertos solares fotovoltaicos
- Fig. 6.16.- Superficie apta para implantar instalaciones solares termoeléctricas
- Fig. 6.17.- Superficie apta para implantar parques eólicos
- Fig. 7.1.- Sistema de integración entre SIG y Evaluación multicriterio
- Fig. 7.2.- Jerarquía AHP para instalaciones solares fotovoltaicas y termoeléctricas
- Fig. 7.3.- Jerarquía AHP para parques eólicos
- Fig. 7.4.- Capacidad Agrológica del litoral de la Región de Murcia
- Fig. 7.5.- Pendientes del litoral de la Región de Murcia
- Fig. 7.6.- Orientación del terreno en el litoral de la Región de Murcia
- Fig. 7.7.- Principales carreteras en el litoral de la Región de Murcia
- Fig. 7.8.- Red eléctrica existente en el litoral de la Región de Murcia
- Fig. 7.9.- Subestaciones transformadoras en el litoral de la Región de Murcia
- Fig. 7.10.- Núcleos de población en el litoral de la Región de Murcia



- Fig. 7.11.- Aeropuertos e infraestructuras de telecomunicaciones en el litoral de la Región de Murcia
- Fig. 7.12.- Temperatura media anual en el litoral de la Región de Murcia
- Fig. 7.13.- Potencial de radiación solar en el litoral de la Región de Murcia
- Fig. 7.14.- Velocidad del viento en el litoral de la Región de Murcia
- Fig. 7.15.- Captura gvSIG con información catastral y valores de criterios en una parcela dada
- Fig. 7.16.- Captura gvSIG de parte de tabla de atributos en localización de instalaciones solares fotovoltaicas
- Fig. 7.17.- Peso de los criterios de E1 para localización de instalaciones solares fotovoltaicas
- Fig. 7.18.- Valores de criterios para localización de instalaciones solares fotovoltaicas (agregación homogénea)
- Fig. 7.19.- Valores de criterios para localización de instalaciones solares termoeléctricas (agregación homogénea)
- Fig. 7.20.- Valores de criterios para localización de parques eólicos (agregación homogénea)
- Fig. 7.21.- Etiquetas lingüísticas de los criterios C1, C2 y C3 según tecnología renovable
- Fig. 7.22.- Introducción de criterios asociados a las alternativas en IRIS
- Fig. 7.23.- Fijación de parámetros en IRIS
- Fig. 7.24.- Fijación de límites en IRIS
- Fig. 7.25.- Fijación de restricciones en IRIS
- Fig. 8.1.- Mapa de capacidad de acogida de instalaciones solares fotovoltaicas en el litoral de la Región de Murcia
- Fig. 8.2.- Distribución de la capacidad de acogida en la superficie disponible del litoral para albergar instalaciones solares fotovoltaicas
- Fig. 8.3.- Mapa de capacidad de acogida de instalaciones solares termoeléctricas en el litoral de la Región de Murcia
- Fig. 8.4.- Distribución de la capacidad de acogida en la superficie disponible del litoral para albergar instalaciones solares termoeléctricas
- Fig. 8.5.- Mapa de capacidad de acogida de parques eólicos en el litoral de la Región de Murcia
- Fig. 8.6.- Distribución de la capacidad de acogida en la superficie disponible del litoral para albergar parques eólicos
- Fig. 8.7.- Alternativas resultantes tras realizar Filtrado nº 1 con gvSIG (localización de instalaciones solares fotovoltaicas)
- Fig. 8.8.- Alternativas resultantes tras realizar Filtrado nº 2 con gvSIG (localización de instalaciones solares fotovoltaicas)



- Fig. 8.9.- Alternativas resultantes tras realizar Filtrado nº 1 con gvSIG (localización de instalaciones solares termoeléctricas)
- Fig. 8.10.- Alternativas resultantes tras realizar Filtrado nº 1 con gvSIG (localización de parques eólicos)
- Fig. 8.11.- Alternativas resultantes tras realizar Filtrado nº 2 con gvSIG (localización de parques eólicos)
- Fig. 8.12.- Alternativas resultantes tras filtrar en función de la velocidad de viento (localización de parques eólicos)
- Fig. 8.13.- Veinte mejores emplazamientos para albergar instalaciones solares fotovoltaicas y termoeléctricas según el método TOPSIS difuso
- Fig. 8.14.- Veinte mejores emplazamientos para albergar parques eólicos según el método TOPSIS difuso
- Fig. 8.15.- Clasificación de alternativas aplicando ELECTRE-TRI mediante IRIS (localización de instalaciones solares fotovoltaicas)
- Fig. 8.16.- Clasificación de alternativas aplicando ELECTRE-TRI mediante IRIS (localización de instalaciones solares termoeléctricas)
- Fig. 8.17.- Clasificación de alternativas aplicando ELECTRE-TRI mediante IRIS (localización de parques eólicos)



LISTADO DE TABLAS

Tabla 2.1.- Consumo de energía primaria

Tabla 2.2.- Previsiones de biomasa para aplicaciones eléctricas

Tabla 2.3.- Potencial energético en biomasa de la Región de Murcia

Tabla 2.4.- Valores de rendimientos en términos de Biogás de los diferentes residuos

Tabla 2.5.- Valores de potencial anual de biogás en la Región de Murcia en GWh

Tabla 2.6.- Previsiones de aprovechamiento de energía eólica de la Región de Murcia

Tabla 3.1.- Tipos de formato de capas temáticas en gvSIG

Tabla 4.1.-Aplicaciones de MCDM, Soft Computing, EERR y GIS en la literatura

Tabla 5.1.- Propuestas de escalas de asignación directa

Tabla 5.2.- Escala fundamental de comparación pareada

Tabla 5.3.- Índice de consistencia aleatorio (RI) función de la dimensión de la matriz (n)

Tabla 5.4.- Matriz de decisión

Tabla 5.5.- Matriz de decisión difusa

Tabla 6.1.- Capas temáticas.- Denominación y procedencia

Tabla 6.2.- Superficies mínimas en función del tipo de EERR

Tabla 6.3.- Superficies aptas para implantar instalaciones de EERR en el litoral de la RM

Tabla 7.1.- Esquema de tabla de atributos en plantas solares

Tabla 7.2.- Esquema de tabla de atributos en parques eólicos

Tabla 7.3.- Orden de importancia de los criterios para cada uno de los expertos

Tabla 7.4.- Escala de valoración en el proceso de comparación por pares

Tabla 7.5.-Pesos de los criterios en localización de instalaciones solares fotovoltaicas

Tabla 7.6.- Pesos de los criterios en localización de instalaciones solares termoeléctricas

Tabla 7.7.- Pesos de los criterios en localización de parques eólicos

Tabla 7.8.- Vector de pesos mediante agregación homogénea y media aritmética para el problema de localización de instalaciones solares fotovoltaicas

Tabla 7.9.- Vector de pesos mediante agregación homogénea y media aritmética para el problema de localización de instalaciones solares termoeléctricas

Tabla 7.10.- Vector de pesos mediante agregación homogénea y media aritmética para el problema de localización de parques eólicos

Tabla 7.11.- Matriz de decisión difusa para localización de emplazamientos de instalaciones solares fotovoltaicas

Tabla 7.12.- Matriz de decisión difusa para localización de emplazamientos de instalaciones solares termoeléctricas

Tabla 7.13.- Matriz de decisión difusa para localización de emplazamientos de parques eólicos

Tabla 7.14.- Matriz de decisión (localización de emplazamientos de plantas fotovoltaicas)



- Tabla 7.15.- Matriz normalizada (localización de emplazamientos de plantas fotovoltaicas)
- Tabla 7.16.- Matriz ponderada (localización de emplazamientos de plantas fotovoltaicas)
- Tabla 7.17.- Valores ideales positivo y negativo (localización de emplazamientos de plantas fotovoltaicas)
- Tabla 7.18.- PIS y NIS (localización de emplazamientos de plantas fotovoltaicas)
- Tabla 8.1.- Límites de categorías para cada criterio que influye en el problema de decisión (localización de instalaciones solares fotovoltaicas)
- Tabla 8.2.- Valores límite de los criterios situados en la categoría 3 (localización de instalaciones solares fotovoltaicas)
- Tabla 8.3.- Valores límite de los 5 mejores criterios situados en la categoría 4 (localización de instalaciones solares fotovoltaicas)
- Tabla 8.4.- Mejores alternativas tras procesos de filtrado en gvSIG (localización de instalaciones solares fotovoltaicas)
- Tabla 8.5.- Límites de categorías para cada criterio que influye en el problema de decisión (localización de instalaciones solares termoelectricas)
- Tabla 8.6.- Valores límite de los criterios situados en la categoría 3 (localización de instalaciones solares termoelectricas)
- Tabla 8.7.- Valores límite de los 3 mejores criterios situados en la categoría 4 (localización de instalaciones solares fotovoltaicas)
- Tabla 8.8.- Mejores alternativas tras procesos de filtrado en gvSIG (localización de instalaciones solares termoelectricas)
- Tabla 8.9.- Límites de categorías para cada criterio (localización de parques eólicos)
- Tabla 8.10.- Valores límite de los criterios situados en la categoría 3 (localización de parques eólicos)
- Tabla 8.11.- Mejores alternativas tras filtrado N° 1 en gvSIG (localización de parques eólicos)
- Tabla 8.12.- Valores límite de los criterios situados en la categoría 2 (localización de parques eólicos)
- Tabla 8.13.- Alternativas resultantes tras filtrar en función de la velocidad de viento(localización de parques eólicos)
- Tabla 8.14.- Evaluación de 20 mejores alternativas con TOPSIS Clásico y Difuso (localización de instalaciones solares fotovoltaicas)
- Tabla 8.15.- Evaluación de 20 mejores alternativas con TOPSIS Clásico y Difuso (localización de instalaciones solares termoelectricas)
- Tabla 8.16.- Evaluación de 20 mejores alternativas con TOPSIS Clásico y Difuso (localización de parques eólicos)
- Tabla 8.17.- Clasificación de 20 mejores alternativas con ELECTRE-TRI mediante IRIS (localización de instalaciones solares fotovoltaicas)
- Tabla 8.18.- Clasificación de 20 mejores alternativas con ELECTRE-TRI mediante IRIS (localización de instalaciones solares termoelectricas)
- Tabla 8.19.- Clasificación de 20 mejores alternativas con ELECTRE-TRI mediante IRIS (localización de parques eólicos)



- Tabla 8.20.- Comparativa entre los métodos TOPSIS y ELECTRE-TRI (localización de instalaciones solares fotovoltaicas)
- Tabla 8.21.- Comparativa entre los métodos TOPSIS y ELECTRE-TRI (localización de instalaciones solares termoeléctricas)
- Tabla 8.22.- Comparativa entre los métodos TOPSIS y ELECTRE-TRI (localización de parques eólicos)



PRIMERA PARTE:

FUNDAMENTOS TEÓRICOS



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN





*“El que sube una escalera debe
empezar por el primer peldaño”.*

Walter Scott

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Acercamiento al tema objeto de estudio y su interés.

1.1.1. Introducción.

El modelo energético actual constituye por su experiencia y madurez una elección fiable y consistente, no obstante su aplicación está estrechamente relacionada con el coste de generación y el incremento de los residuos producidos. Por tanto, parece razonable realizar un esfuerzo en estudiar y evaluar posibles alternativas energéticas que minoren los aspectos negativos de las tecnologías actuales (Panwar et al, 2011).

Por ello en los últimos años se ha apostado por incentivar el desarrollo e implantación de instalaciones de energías renovables. Entre las diversas cuestiones a considerar a la hora de implantar este tipo de instalaciones destaca la ubicación de la misma puesto que, la inversión necesaria para acometer cualquier instalación de esta índole es de tal envergadura que, un mínimo error de planificación puede ocasionar graves perjuicios tanto económicos como medioambientales que incluso pueden llegar a ocasionar el cierre de la actividad.

Con frecuencia la elección y ubicación de la instalación a implantar no obedece a criterios objetivos derivados de un correcto asesoramiento. Normalmente el objetivo de alcanzar un aprovechamiento óptimo conlleva un cierto grado de incertidumbre que, en la mayoría de las ocasiones, podría ser evitable.



En proyectos de instalaciones de energías renovables, como en cualquier otro proyecto de ingeniería, la toma de decisión es una actividad intelectual que resulta necesario e imprescindible afrontar (Lee, A.H.I. et al, 2009). Antes de adoptar cualquier decisión, los hechos, el conocimiento y la experiencia se deben reunir para evaluar el contexto del problema y, aunque habitualmente el promotor de la instalación es el principal decisor, a veces éste no dispone de los conocimientos e información necesarios y, para tomar la decisión requiere la ayuda de un grupo de asesoramiento compuesto por personal experto en diversos campos ó áreas de conocimiento.

En la localización óptima de este tipo de instalaciones intervienen una gran cantidad de criterios que influyen con distinta intensidad en el proceso de toma de decisión de forma que, entre los distintos métodos de toma de decisiones existentes en el panorama actual, para este tipo concreto de problemas de localización, resulta idónea la utilización de *métodos de decisión multicriterio*.

De igual modo, es bastante habitual que los criterios que influyen en la localización de instalaciones de energías renovables presenten distinta naturaleza, coexistiendo criterios de naturaleza cuantitativa con criterios de naturaleza cualitativa. Por ello, resulta necesario recurrir a una combinación de teorías (San Cristóbal, J.R., 2011) y metodologías que permitan aprovechar la tolerancia que conlleva la imprecisión y la incertidumbre, para conseguir manejabilidad, robustez y soluciones de bajo coste. Dicha combinación se denomina *Soft Computing* y de entre sus múltiples herramientas, para resolver problemas de toma de decisiones con criterios de distinta naturaleza, es inevitable utilizar la *Lógica Fuzzy o Difusa* (Zadeh, L.A., 1965) ya que, cuando intervienen datos que representan algún tipo de vaguedad o incertidumbre, el modelado lingüístico se representa como una metodología apropiada que tiene como base teórica la Teoría de Conjuntos difusos. Tales ingredientes se presentan como valiosas herramientas para ayudar al decisor durante este proceso de toma de decisiones.

Además, el grupo decisor no sólo deberá aplicar sus conocimientos y experiencia en sistemas de ayuda a la decisión (Haralambopoulos y Polatidis, 2003), sino que resultará conveniente utilizar la mayoría de las herramientas disponibles ya que, cuando metodologías tales como los métodos de decisión multicriterio se aplican a problemas



ambientales (Chang, N.B. et al, 2009), ordenación del territorio, optimización de emplazamientos, etc. es necesario manejar una gran cantidad de información espacial. Para utilizar de forma eficaz y fiable dicha información el grupo decisor necesita emplear un conjunto de herramientas en las que, destacan por encima del resto los *Sistemas de Información Geográfica (SIG)*. Estos sistemas permiten operar aislada y conjuntamente con las más diversas variables espacialmente consideradas favoreciendo el análisis multicriterio ya que, posibilitan combinar y valorar simultáneamente los criterios (las bases para la toma de decisión) con sus factores (los aspectos que los fortalecen o los debilitan) a través del manejo de sus atributos (las variables) dentro de unas determinadas reglas de decisión. Por ello, los SIG son esenciales para esa tarea, y pueden ser usados para desarrollar herramientas de ayuda a la decisión muy flexibles aplicables a problemas tales como la ubicación de emplazamientos óptimos de instalaciones de energías renovables (Janke, J.R., 2010).

Por tanto, para el problema de localización de instalaciones de energías renovables, la combinación de los SIG con la Soft Computing es de suma importancia ya que, mientras que los SIG han sido reconocidos como poderosos instrumentos con capacidades únicas para almacenar, manipular, analizar y visualizar datos espaciales para la toma de decisiones, la Soft Computing proporciona una rica colección de procedimientos y algoritmos para la estructuración de los problemas de decisión, diseño, evaluación y priorización de alternativas de decisión.

1.1.2. Finalidad principal de la investigación.

La *finalidad principal* de esta investigación consiste en resolver un problema de localización, concretamente en buscar y evaluar emplazamientos óptimos para albergar instalaciones de energías renovables en la costa de la Región de Murcia. Para ello, se demostrará como es posible combinar los SIG con la Soft Computing empleando metodología de decisión multicriterio y lógica difusa.



1.2. Objetivos de la investigación.

El objetivo de la presente investigación consiste en utilizar los Sistemas de Información Geográfica (SIG) como base de datos y la Soft Computing como herramienta de cálculo con la finalidad de optimizar la ubicación o emplazamientos para implantar instalaciones de energías renovables (concretamente energía eólica, solar fotovoltaica y solar termoeléctrica) en la costa de la Región de Murcia.

Para alcanzar este objetivo de carácter general, resulta necesario resolver una serie de objetivos específicos;

El primero de ellos consistirá en, mediante la aplicación de un SIG con varias capas temáticas, seleccionar las superficies aptas para albergar las instalaciones de energías renovables indicadas, para ello no sólo se requiere disponer de la información geográfica necesaria, sino que además se debe profundizar en el marco legislativo de la zona de estudio para poder efectuar un adecuado tratamiento y procesado de dicha información.

Otro de los objetivos específicos del presente estudio será la determinación del peso o coeficiente de importancia de los criterios que constituyen las distintas capas temáticas. Debido a que existen distintos criterios que intervienen en la decisión y que además están caracterizados mediante estructuras jerárquicas, de entre los diversos métodos de decisión multicriterio existentes en el panorama actual, para determinar la importancia o ponderación de tales criterios, se empleará la metodología propuesta por Saaty en 1980 y denominada Proceso Analítico Jerárquico (AHP). Para alcanzar este objetivo y, a consecuencia de que los criterios son de distinta naturaleza (cualitativa y cuantitativa) se recurrirá también al empleo del modelado lingüístico difuso.

La consecución del objetivo general implica la evaluación de un número muy elevado de alternativas para cada una de las tecnologías renovables de manera que, este objetivo general se deberá alcanzar empleando un proceso de cálculo sencillo, eficaz y adecuado a las condiciones indicadas (criterios de distinta naturaleza y gran cantidad de alternativas a evaluar), por ello, se empleará el método de decisión multicriterio



denominado TOPSIS (Hwan y Yoon, 1981) y su variante para números difusos (TOPSIS difuso).

Finalmente, con el objetivo de comprobar la validez de las metodologías utilizadas, se llevará a cabo un proceso de comparación de metodologías de decisión multicriterio en el que se comparará la metodología utilizada con otro método multicriterio ampliamente extendido en la actualidad y denominado ELECTRE-TRI (Roy y Bouyssou, 1991).

1.3. La estructura del trabajo

La presente memoria de Tesis está estructurada en nueve capítulos los cuales están agrupados en cuatro partes (fundamentos teóricos, metodología, análisis y resultados), éstos se han enumerado siguiendo una distribución lógica en función a como se ha ido desarrollando la investigación.

Tras la **introducción**, donde se expone el interés de la investigación y los objetivos que con ella se persiguen, se desarrollan las partes principales sobre las que se apoya el trabajo. En la **primera parte**, que recoge los **fundamentos teóricos** del trabajo, se desarrolla una revisión de las principales aportaciones realizadas en el ámbito de estudio desde la perspectiva de las energías renovables, los sistemas de información geográfica y la toma de decisiones. La **segunda parte** recoge la **metodología**, en la que se describen las técnicas de soft computing que serán utilizadas así como los métodos de decisión multicriterio a aplicar con la finalidad de valorar y clasificar las diferentes alternativas. En la **tercera parte**, se procederá a realizar el **análisis** del caso particular descrito, para ello se seleccionarán las superficies aptas para albergar instalaciones de energías renovables y se evaluarán los emplazamientos óptimos según las técnicas de ayuda a la decisión previamente indicadas. En la **cuarta parte**, se presentan los **resultados y las conclusiones** finales, las limitaciones del trabajo y se establecen las futuras líneas de investigación que se abren tras las aportaciones realizadas.

Finalmente, además del índice de figuras y tablas, habrá un **apartado de Anexos** en el que se recogen los cuestionarios a expertos que ha sido necesario realizar para llevar a cabo la presente investigación (Anexos I y II).



La estructura general del trabajo se muestra esquemáticamente en la Figura 1.1.: El contenido de cada uno de los capítulos se sintetiza a continuación:

En el **capítulo de introducción** se expone el campo de estudio al que se circunscribe el análisis a realizar, recogiendo el interés y justificación del tema objeto de estudio, los principales objetivos a alcanzar y la estructura del trabajo de tesis.

El **segundo capítulo** plantea el marco teórico general de las energías renovables, indicando la situación actual y la perspectiva futura tanto del sector energético como del sector eléctrico. Se profundizará en la situación de dichas energías en la Región de Murcia. centrando la atención en la energía eólica, energía solar fotovoltaica y energía solar térmica de alta temperatura (o solar termoelectrica).

En el **capítulo tercero**, específicamente dedicado a los sistemas de información geográfica, se describirán las características generales de los SIG profundizando en el software SIG utilizado, argumentando su elección y destacando de entre sus múltiples herramientas aquellas que serán utilizadas en el análisis posterior.

En el **capítulo cuarto**, se describirá el marco teórico de la toma de decisión y la soft computing, para ello se partirá de conceptos básicos, para posteriormente clasificar los diversos problemas de decisión y definir tanto las fases que los estructuran como las distintas escuelas de decisión existentes. Se hará mención especial a la toma de decisión en energías renovables así como a los procesos de toma de decisión basados en SIG.

En el **capítulo quinto**, se define la metodología que se utilizará en el desarrollo de la investigación, se profundizará en aquellos métodos y técnicas de decisión multicriterio que serán de aplicación para valorar las alternativas a analizar y, se describirá un software de decisión que será utilizado para su posterior clasificación.

En el **capítulo sexto**, tras definir los conceptos teóricos de aplicación y revisar las principales aportaciones sobre energías renovables, SIG y soft computing, se procederá a la etapa de análisis, ésta se dividirá en dos fases, la primera estará definida en este capítulo y consistirá en introducir la información cartográfica en el software SIG y



proceder a su edición con el objetivo de seleccionar las superficies aptas para albergar instalaciones de energías renovables.

En el **capítulo séptimo**, se llevará a cabo la segunda fase de la etapa de análisis, ésta consistirá en ejecutar la regla de decisión partiendo de los datos obtenidos en el software SIG para evaluar los emplazamientos óptimos y proceder a su clasificación mediante un software de decisión.

En el **capítulo octavo**, se recogen los resultados obtenidos para las diferentes tecnologías de energías renovables tratadas y se realiza un proceso de validación del modelo con el objetivo de dar mayor consistencia a la metodología aplicada.

Finalmente, el **capítulo noveno** cierra la investigación, recogiendo las principales conclusiones del trabajo y, proponiendo futuras líneas de investigación a seguir en trabajos posteriores, sin olvidar las limitaciones de la investigación.

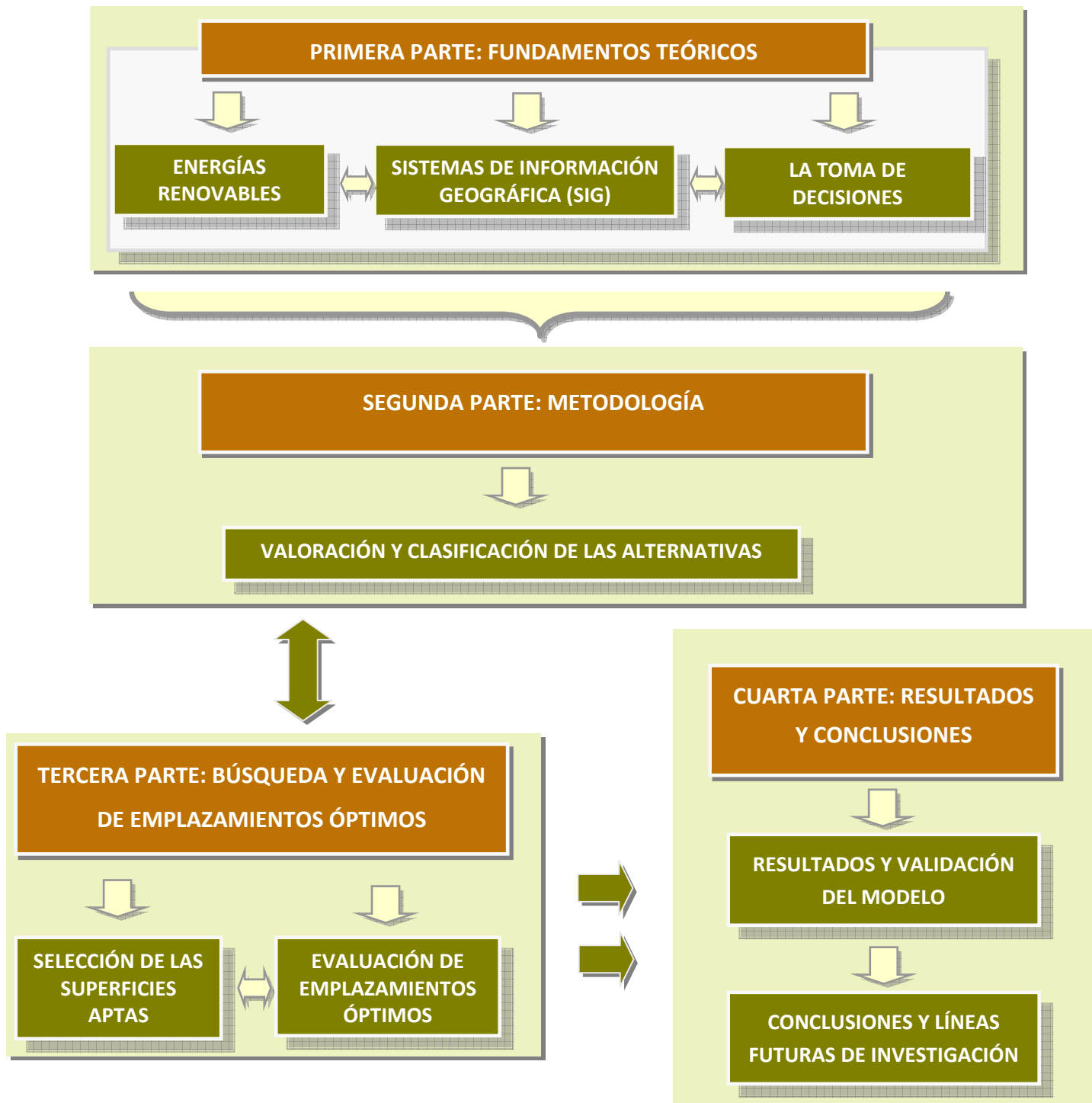


Fig. 1.1.- Estructura del trabajo



1.4. Referencias bibliográficas del Capítulo I

- Chang, N.B., Chang, Y.H. y Chen H.W. (2009). Fair fund distribution for a municipal incinerator using GIS-based fuzzy analytic hierarchy process. *Journal of Environmental Management*, 90, pp. 441-454.
- Haralambopoulos, D.A. y Polatidis, H. (2010). Renewable energy projects: structuring a multicriteria group decision-making framework, *Renewable Energy*, 28, pp. 961–973.
- Hwang, C.L. y Yoon, K., (1981). *Multiple Attribute Decision Methods and Applications*, Springer, Berlin Heidelberg ed.
- Janke, J.R. (2010). Multicriteria GIS modeling of wind and solar farms in Colorado. *Renewable Energy*, 35, pp. 2228-2234.
- Lee, A.H.I., Chen, H.H. y Kang, H.Y. (2009). Multi-criteria decision making on strategic selection of wind farms. *Renewable Energy*, 34, pp. 120–126.
- Panwar, N.L., Kaushik, S.C. y Kothari, S. (2011). Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, pp. 1513–1524.
- Roy, B. y Bouyssou, D. (1991). *Aide à la décision fondée sur une PAMC de type ELECTRE*. Université Paris-Dauphine. Document du LAMSADE, 69. 118 p.
- San Cristobal, J.R. (2011). A multi criteria data envelopment analysis model to evaluate the efficiency of the Renewable Energy technologies. *Renewable Energy*, 36, pp. 2742-2746.
- Saaty, T.L., (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York.
- Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8, pp. 338-353.



CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO GENERAL.- ENERGÍAS RENOVABLES





*“Lo que sabemos es una gota de agua,
lo que ignoramos es el océano”.*

Isaac Newton

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO GENERAL.- ENERGÍAS RENOVABLES

2.1. Energías renovables. Situación actual y futura.

2.1.1. Situación del sector energético.

A finales del siglo XIX comenzó a sospecharse que se habían producido cambios naturales en las condiciones climáticas del planeta Tierra y se identificó por primera vez el efecto invernadero (Arrhenius, S., 1896). La comunidad científica alertó a la población sobre la amenaza que planteaba dicho descubrimiento y los efectos que podía provocar en el clima.

La recogida de datos medioambientales efectuada a mediados del siglo XX permitió demostrar que las concentraciones de dióxido de carbono (principal causante del aumento del efecto invernadero) en la atmósfera estaban creciendo con mucha rapidez.

A través del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM), en 1988 se creó el Grupo Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC). En el año 1990 el IPCC elaboró un informe inicial en el que se indicaba la veracidad del calentamiento atmosférico y al mismo tiempo se solicitaba a la comunidad internacional la adopción de medidas con el objetivo de evitarlo.



En respuesta al informe realizado por el IPCC, la Organización de Naciones Unidas (ONU) aprobó la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (Naciones Unidas, 1992). El principal objetivo de la Convención queda reflejado en su artículo 2: “lograr la estabilidad de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático”, no obstante no se especificaba cuáles deberían ser esos límites de concentración. Aunque dicha convención debía corroborarse y firmarse en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo celebrada en Río de Janeiro en 1992, no fue ratificada hasta el año 1994, año en la que entró en vigor.

Con el objetivo de establecer los niveles de emisión, en la reunión celebrada en diciembre de 1997 se elaboró el Protocolo de Kioto (Naciones Unidas, 1997) en el cual se indicaba la limitación de emisiones netas de efecto invernadero para los principales países desarrollados y con economías en transición, tomando como referencia las emisiones generadas en el año 1990 y definiendo un primer periodo de compromiso (del año 2008 al 2012). La cantidad atribuida a cada país sería el porcentaje consignado de sus emisiones (expresadas en dióxido de carbono equivalente) de los gases de efecto invernadero correspondientes al año 1990. Para el caso particular de España, estas emisiones debían reducirse en un 8%. Para la consecución de los objetivos se establecieron una serie de políticas y medidas entre las que destacaba el aumento del uso de *energías renovables (EERR)*.

Con carácter previo al Protocolo de Kioto, la Unión Europea había reconocido la necesidad de realizar una gestión eficaz de todos los recursos disponibles mediante una combinación de combustibles equilibrada, en la que cada una de las fuentes de energía desempeñase su papel con el objetivo de apoyar un crecimiento económico sostenible, por ello en la Comisión de las Comunidades Europeas celebrada en Bruselas en el año 1996, se presentó el denominado Libro Verde que marcaba un objetivo ambicioso consistente en alcanzar para el año 2010 una contribución de las EERR próxima al 12 % del consumo energético interior bruto. El Libro Verde constituyó la primera etapa en el establecimiento de una estrategia para las fuentes de energía con origen renovable. Fue



concebido para abrir un debate sobre las medidas más urgentes y necesarias que podrían llevarse a cabo a nivel de la Comunidad y de los Estados miembros, así como sobre la naturaleza de las mismas.

Basándose en las reacciones y observaciones de las consultas con los Estados miembros, otras instituciones comunitarias y con las partes interesadas, la Comisión Europea publicó a mediados de 1997 el denominado Libro Blanco en el que se definía una estrategia común (hasta el año 2010) en materia de fuentes de energía de origen renovable, acompañada de un plan de acción. Debido a que el Libro Verde obtuvo una rotunda respuesta positiva, los planes estratégicos y de acción del Libro Blanco se dirigieron hacia el objetivo de lograr una penetración de dichas fuentes de energía en la Unión Europea del 12% antes del año 2010. Ese objetivo global implicó que los Estados de la Unión Europea debían de fomentar el aumento de las fuentes de energía de origen renovable de acuerdo a su propio potencial.

En España, la necesaria contención del crecimiento de las emisiones de gases de efecto invernadero establecida por el Protocolo de Kioto y, el cumplimiento del objetivo indicado en el Libro Blanco de la Unión Europea, fueron las razones principales por las que se creó el denominado Plan de Fomento de las Energías Renovables (PFEERR).

El PFEERR para el periodo 2000-2010 fue aprobado por acuerdo del Consejo de Ministros en diciembre del año 1999. En él, se establecían una serie de medidas fiscales, estructurales y de eliminación de barreras con el objetivo de alcanzar los compromisos acordados.

A consecuencia de la necesidad de cumplimiento de las directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de la Unión Europea, en el año 2005 se realizó una revisión del citado Plan mediante el denominado Plan de Energías Renovables en España (PER) 2005-2010, en el mismo se mantenía el compromiso de cubrir con fuentes renovables al menos el 12 % del consumo total de energía en 2010 y se incorporaban dos nuevos objetivos: alcanzar el 29,4% de generación eléctrica con fuentes de energía de origen renovable y 5,75% de biocarburantes en transporte para el año 2010.



La aplicación de las políticas de apoyo a las EERR mencionadas provocaron un crecimiento notable, y así, en términos de consumo de energía primaria, pasaron de cubrir una cuota del 6,3% en 2004 a alcanzar el 11,3% en 2010. Este porcentaje correspondiente al año 2010 se elevaba al 13,2% si la contribución de las EERR se expresaba en términos de consumo final bruto de energía (según la metodología propuesta en la Directiva 2009/28/CE). La figura 2.1 muestra la estructura de dicho consumo.

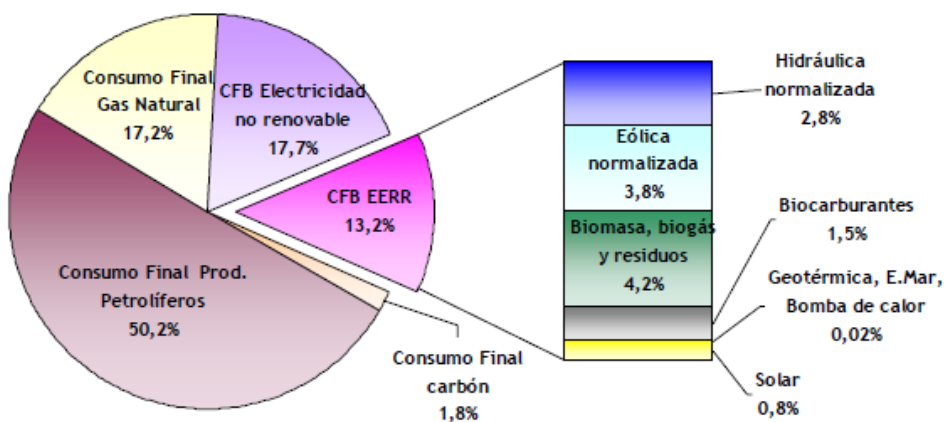


Fig.2.1.- Consumo final bruto de energía en 2010 (PANER 2011-20)

Antes de que finalizara el periodo de vigencia del PER 2005-2010, se definió un nuevo marco normativo europeo (Directiva 2009/28/CE) que derogaba a las anteriores directivas y en la que se establecían como objetivos obligatorios nacionales, alcanzar una cuota del 20% de energía procedente de fuentes renovables en el consumo de energía y, una cuota del 10 % de energía procedente de fuentes renovables en el consumo de combustibles para el transporte en la Comunidad Europea para 2020. La citada Directiva requería que cada Estado miembro elaborara y notificara a la Comisión Europea (CE), un Plan de Acción Nacional de Energías Renovables (PANER) para el periodo 2011-2020. A consecuencia de ello el Gobierno Español elaboró un nuevo Plan para el periodo 2011-2020.



Tras la elaboración del PANER 2011-2020, y en el marco de una evolución muy negativa de la economía mundial y española, en diciembre de 2010 se aprobó en el Congreso de los Diputados un documento, en el que se recomendaba que la participación de las EERR fuera del 20,8% en el año 2020. Este es el objetivo global que se recoge en el PER 2011-2020, que da respuesta, a su vez, al artículo 78 de la Ley 2/2011, de Economía Sostenible, la cual fija los mismos objetivos que la Directiva 2009/28/CE.

Según el PANER 2011-2020, la exigencia de los imperativos energéticos y medioambientales que condicionan la política energética española, unida a la necesidad de dar solución a la elevada dependencia, junto a las previsibles inversiones en infraestructuras energéticas de interconexión con los mercados europeos a través de Francia, hacen prever que siga aumentando la importancia del gas natural y, especialmente, las EERR, que irán ganando cuota progresivamente, fundamentalmente, en detrimento del petróleo, cubriendo conjuntamente cerca del 50% de la demanda de energía primaria en el horizonte del 2020 (Tabla 2.1).

ktep	2005	2010	2015	2020
Carbón	21.183	9.198	10.641	10.533
Petróleo	71.765	60.441	54.100	49.680
Gas Natural	29.116	32.314	35.486	39.118
Nuclear	14.995	14.594	14.490	14.490
Energías Renovables	8.371	13.966	19.798	28.095
Saldo Electr. (Imp.-Exp.)	-116	-688	-971	-2.167
Total Energía Primaria	145.314	129.825	133.544	139.749

Tabla 2.1.- Consumo de energía primaria (PANER 2011-2020)

2.1.2. Situación del sector eléctrico.

La generación eléctrica en España ha experimentado una importante transformación desde finales de los años 90, a lo que ha contribuido por un lado la progresiva penetración del gas natural (principalmente en centrales de ciclo combinado y en cogeneración) y por otro, las EERR, cuya cobertura evoluciona al alza según se observa en la figura 2.2.

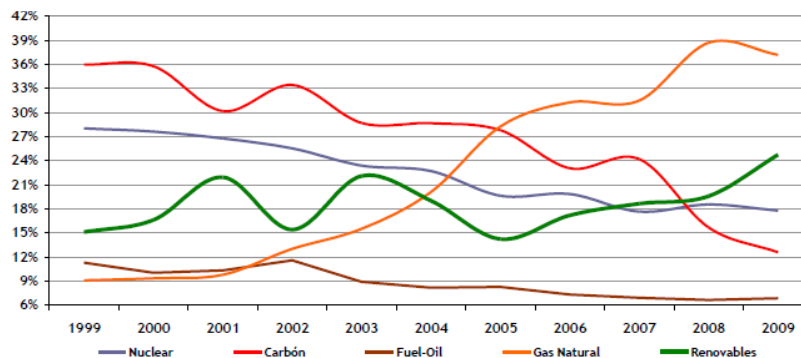


Fig. 2.2.- Participación de las distintas fuentes de energía en la generación eléctrica (PANER 2011-2020)

Entre las diversas causas del alza de las EERR destaca el marco normativo español, comenzando con la Ley 54/1997 del Sector Eléctrico en la que se definió la actividad de producción eléctrica en régimen especial y su derecho a percibir una retribución o prima, la cual sería fijada por el Gobierno. Como desarrollo de la citada Ley, se elaboró el Real Decreto 2818/1998 en el que se definían los incentivos a percibir la actividad de producción eléctrica en régimen especial en función del tipo de EERR. Con dicho Real Decreto se pretendía alcanzar el objetivo de que la aportación mediante EERR a la demanda energética de España fuera como mínimo del 12% para el año 2010. Este valor se ha alcanzado con creces ya que según se muestra en la fig. 2.2., en el año 2009 la aportación renovable superaba la barrera del 24 %.

Como medida de establecer un marco regulatorio duradero, objetivo y transparente para todos aquellos que quisiesen apostar por el régimen especial, se elaboró el Real Decreto 436/2004 que establecía la metodología para la actualización y sistematización del régimen jurídico y económico de la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial.

Las EERR en España llegaron a evolucionar con una participación creciente en el sistema energético, hecho que se evidenció en la cobertura de la demanda. Dicha situación provocó un significativo auge a partir del año 2005.

Como consecuencia del crecimiento experimentado en estos años y la experiencia acumulada con la anterior normativa, se puso de manifiesto la necesidad de regular



ciertos aspectos técnicos para contribuir al crecimiento de las tecnologías renovables salvaguardando la seguridad en el sistema eléctrico y garantizando su calidad de suministro; dicha regulación se llevó a cabo a través del Real Decreto 661/2007.

Según datos de la Comisión Nacional de la Energía (CNE), en agosto de 2007 ya se había superado el 85 por ciento del objetivo de potencia fotovoltaica instalada para 2010 y en el mes de mayo de 2008, se habían alcanzado los 1.000 MW. De igual modo, a consecuencia de su elevado crecimiento había sido necesario modificar los objetivos de potencia de energía eólica instalada para el año 2010 ampliándolos de 8.155 MW a 20.155 MW. Con el argumento de asegurar su eficiencia, el Real Decreto 661/2007 debía adaptarse de forma proporcional al desarrollo de la tecnología solar fotovoltaica ya que, una retribución excesiva podría repercutir de manera significativa en los costes del sistema eléctrico y desincentivaría la apuesta por la investigación; en el año 2008 se aprobó el Real Decreto 1578/2008 en el que se modificaba el régimen económico de la tecnología solar fotovoltaica a la baja.

En el año 2009, las EERR habían supuesto el 9,4% del abastecimiento de energía primaria, y superado el 12% en términos de energía final bruta. La producción eléctrica de origen renovable experimentó un incremento superior al 40%, alcanzando en ese año el 24,7% de la producción eléctrica bruta de España (figura 2.3.).

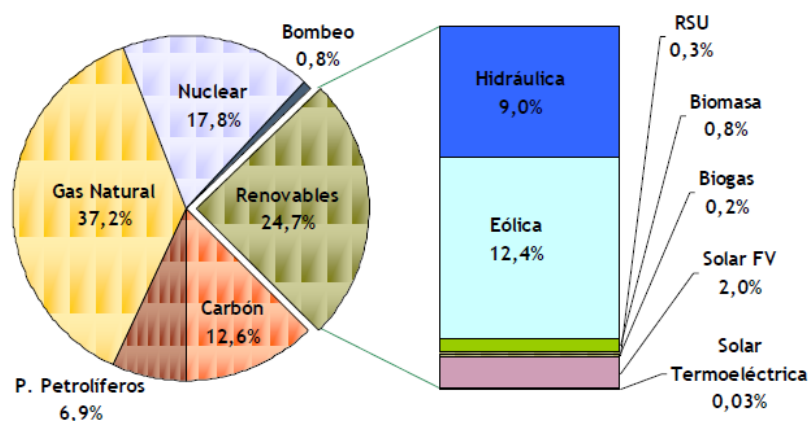


Fig. 2.3.- Producción eléctrica según MITyC/IDEA. Año 2009 (PANER 2011-2020)



En el año 2010, a causa del déficit tarifario del sector eléctrico (diferencia entre los ingresos procedentes de los peajes de acceso a las redes de transporte, distribución de energía eléctrica y los costes de las actividades reguladas del sector eléctrico), se adoptaron diversas medidas con carácter urgente a través del Real Decreto Ley 14/2010; entre ellas destaca la limitación de las horas equivalentes de funcionamiento de las instalaciones fotovoltaicas en función a la zona climática donde se sitúen y al tipo de instalación.

En la actualidad, por motivo de la crisis económica y la situación del déficit tarifario del sistema eléctrico, el Consejo de Ministros ha aprobado el Real Decreto Ley 1/2012 en el que se suspenden con carácter temporal los procedimientos de preasignación de retribución renovable y los incentivos económicos para nuevas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovable, residuos y cogeneración.

2.1.3. Instalaciones de EERR. Conceptos generales.

2.1.3.1. Biomasa, biogás y biocombustibles.

Según el IDAE la *biomasa* se define como el conjunto de materia orgánica, de origen vegetal o animal y los materiales que proceden de su transformación natural o artificial. En dicha definición estarían incluidos los residuos procedentes de las actividades agrícolas, ganaderas y forestales, así como los subproductos de las industrias agroalimentarias y de transformación de la madera.

El PANER 2011-2020 clasifica la biomasa de la siguiente forma:

- A) Biomasa procedente de la silvicultura, aquella que procede del cultivo de los bosques o montes, la cual se divide en función a su origen en los siguientes tipos:
 - 1) Suministro directo de biomasa: Madera procedente de bosques y otras superficies forestales para generación de energía



- 2) Suministro indirecto de biomasa para generación de energía: aquella que procede de aserrado, industria de la madera y del mueble, industria del papel, madera reciclada, etc.

B) Biomasa procedente de la agricultura y la pesca, clasificada también mediante dos tipos:

- 1) Cultivos agrícolas y productos de la pesca proporcionados directamente para la generación de energía: cultivos herbáceos, algas, etc.
- 2) Subproductos de la agricultura y de la pesca para la generación de energía: paja, estiércol, grasa animal, harina de carne y huesos, recortes de vides, etc.

C) Biomasa procedente de residuos, dividida en este caso en tres subclases:

- 1) Fracción biodegradable de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) incluidos los residuos biológicos y gases de vertedero
- 2) Fracción biodegradable de residuos industriales
- 3) Lodos de depuración

De las previsiones para el suministro nacional de biomasa establecidas en el PANER 2011-2020, las clases de biomasa susceptibles de aplicación eléctrica son las siguientes (Tabla 2.2):

	<i>Distribución 2015 (ktep)</i>	<i>Distribución 2020 (ktep)</i>
Cultivos energéticos	105	335
Biomasa agrícola	137	284
Biomasa forestal	172	338
Biomasa industrias agrícolas	381	435
Biomasa industrias forestales	214	251
Lejías negras (*)	417	416

(*) **Procedentes de la industria del papel.**

Tabla 2.2.- Previsiones de biomasa para aplicaciones eléctricas (PANER 2011-2020)



Entre las diversas transformaciones de energía que ofrece la biomasa, destacan por encima del resto el *biogás* y los *biocombustibles*.

El CIEMAT define el biogás como el resultado de la digestión de la biomasa en condiciones anaerobias (en ausencia de oxígeno). Por tanto, el biogás es un subproducto obtenido a partir de la gestión de determinados residuos, éstos son los siguientes:

- Residuos procedentes de vertederos controlados de residuos sólidos urbanos (RSU)
- Lodos generados en las depuradoras de aguas residuales urbanas (EDAR)
- Residuos agroindustriales biodegradables
- Residuos ganaderos

El biogás puede ser utilizado para diversos fines, de ellos destacan principalmente la generación tanto de energía eléctrica como de energía térmica.

El *biocombustible* es un tipo de EERR destinado al sector del transporte, es un carburante que se puede utilizar en los motores de combustión interna (MCI) actuales y su procedencia es el conjunto de la materia orgánica generada a partir de la fotosíntesis (biomasa). Los biocombustibles a su vez pueden ser clasificados en función del tipo de receptor, si el MCI es de ciclo diesel el biocombustible se denomina biodiesel, en cambio si el MCI es de ciclo Otto se denomina bioetanol el cual también puede ser empleado para fabricar un aditivo de un tipo concreto de gasolinas.

La procedencia del biodiesel es la semilla oleaginosa (colza, girasol, soja, etc.), no obstante también se puede obtener a partir del reciclado de aceites usados. El bioetanol en cambio procede de semillas ricas en azúcares fermentadas (remolacha, maíz, cereales, caña de azúcar, etc.).

2.1.3.2. Energía hidráulica.

La *energía hidráulica* es obtenida mediante el aprovechamiento de la energía cinética de las corrientes de los ríos y la energía potencial generada a consecuencia de las



diferencias de altura en los denominados saltos de agua. La explicación del por qué este tipo de energía se considera renovable tiene su origen en el ciclo hídrico; éste se fundamenta en el constante movimiento o transferencia de las masas de agua en sus diferentes estados (líquido, gaseoso y sólido), desde los océanos hasta las más altas cotas del terreno y a la inversa. Este flujo de agua se produce por dos causas principales: la energía solar y la gravedad.

La energía hidráulica se ha utilizado en el transcurso del tiempo tanto para obtener energía mecánica como energía eléctrica. Aunque las ventajas que presenta este tipo de aprovechamiento energético son múltiples, presenta importantes limitaciones en cuanto a la disponibilidad de los recursos hidráulicos, dependencia de factores meteorológicos y estacionales.

2.1.3.3. Energía solar fotovoltaica.

La energía solar es el origen de la mayoría de las fuentes de energía en el planeta. La radiación solar que recibe la tierra es muy superior al consumo de la humanidad, en cifras, la energía captada por la Tierra procedente del sol es de valor aproximado 1.8×10^{11} MW, resultando un valor claramente superior al consumo energético actual (Bhubaneswari et al, 2011).

La *energía solar fotovoltaica* consiste en transformar la radiación incidente del sol en energía eléctrica, su principio de funcionamiento está basado en el efecto fotoeléctrico y, el elemento donde se lleva a cabo tal efecto se denomina célula fotovoltaica. Las células fotovoltaicas se agrupan formando módulos que a su vez, se combinan entre sí (mediante distribuciones en serie o en paralelo) para formar lo que comúnmente se denomina central o planta solar fotovoltaica.

La energía solar fotovoltaica se está postulando como una alternativa fiable y, aunque todavía no ha alcanzado el suficiente grado de madurez, se están realizando notables esfuerzos en su investigación tecnológica apuntando hacia menores costes de fabricación y mayores eficiencias (García-Cascales, M.S., et al, 2012)



Las principales aplicaciones de la energía solar fotovoltaica se centran en la generación de energía en instalaciones que verterán la energía eléctrica generada a la red de distribución y en instalaciones aisladas, en éstas últimas se requiere el empleo de un sistema de almacenaje que permita disponer durante la noche de la energía generada. Una forma de clasificar la energía solar fotovoltaica con conexión a red sería en función a su disposición sobre el terreno, de ese modo se clasifican en instalaciones fijas o con seguimiento solar. Las instalaciones fijas están caracterizadas por la posición estática de sus módulos fotovoltaicos, mientras que, las instalaciones con seguimiento disponen de soportes móviles que agrupan varios módulos y que son orientados en función de la posición solar.

2.1.3.4. Energía solar térmica de baja temperatura.

Entre las aplicaciones de la energía solar cabría destacar las siguientes: generación de energía eléctrica (ya sea para autoconsumo o vertido a la red de distribución) y generación de energía térmica mediante el calentamiento de un fluido a través de concentradores (colectores solares térmicos) con la finalidad de obtener calor, esta segunda aplicación corresponde a un tipo de EERR denominada *energía solar térmica*.

Aunque la energía solar térmica se clasifica a su vez en instalaciones de alta o baja temperatura, únicamente las de baja temperatura se utilizan para generación de energía térmica destinada a los sectores industrial, terciario y residencial. Se denomina de baja temperatura porque el ciclo del fluido caloportador no supera en general los 150 °C. En estos sistemas el calor es transferido desde su punto de obtención (colectores solares) hasta su almacenamiento (depósitos de acumulación) y a partir de dicho almacenamiento se distribuye en función del uso al que se vaya a destinar. La energía solar de baja temperatura se suele utilizar para generar agua caliente sanitaria (ACS) ya sea destinada al sector industrial (vestuarios de una industria, etc.), residencial (calefacción de viviendas, etc.) o terciario (calentamiento de los vasos de expansión de una piscina, etc.).

La energía solar térmica, al contrario de lo que ocurría con los biocombustibles, no requiere la consecución de unos objetivos fijados, no obstante se han establecido



normativas específicas (Código Técnico de la Edificación, 2006) para fomentar e impulsar la implantación de este tipo de EERR como estrategias de ahorro energético y eficiencia energética.

2.1.3.5. Energía solar de alta temperatura con conexión a red (Termoeléctrica).

Otra variante de la energía solar térmica es la denominada energía solar térmica de alta temperatura con conexión a la red de distribución, ésta es aplicada para generación de energía eléctrica mediante la transformación del calor en energía mecánica y ésta a su vez en energía eléctrica, por ello, comúnmente se denomina energía solar termoeléctrica.

La *energía solar térmica de alta temperatura* se fundamenta en el calentamiento de un fluido térmico a una temperatura lo suficientemente elevada para que permita iniciar un ciclo termodinámico convencional en el que se transmite el calor de un foco caliente a un foco frío generando energía mecánica, la cual a través de un alternador se transformará en energía eléctrica. Para conseguir la elevada temperatura que permita obtener el necesario salto térmico, resulta necesario concentrar la radiación solar, según Winter, C.J. et al (1991). Los tres conceptos de concentración solar más utilizados son:

- **Concentradores cilindro-parabólicos:** Son concentradores de foco lineal con seguimiento en un solo eje, concentraciones de la radiación de 30 a 80 veces y potencias por campo unitario de 30 a 80 MW.
- **Sistemas de torre o de receptor central:** Consisten en un campo de helióstatos que siguen la posición del Sol en todo momento (elevación y acimut) y orientan el rayo reflejado hacia el foco colocado en la parte superior de una torre. Los órdenes de concentración de la radiación son de 200 a 1.000 y las potencias unitarias de 10 a 200 MW.
- **Discos parabólicos:** Son pequeñas unidades independientes con reflector parabólico habitualmente conectado a un motor Stirling situado en el foco. Los niveles de concentración son superiores (1.000-4.000) y las potencias unitarias oscilan entre 5 y 25 kW.

Las centrales solares termoelectricas (CST) están llamadas a jugar un papel relevante en la producción de electricidad a gran escala. Las tres tecnologías de concentración solar, si bien presentan diferencias de costes en la primera fase de implantación, proyectan posteriormente costes de producción muy similares (Figura 2.4), dependiendo fundamentalmente de la selección de la tecnología a implantar y sobre todo del tipo de aplicación y del vertido de la electricidad generada.

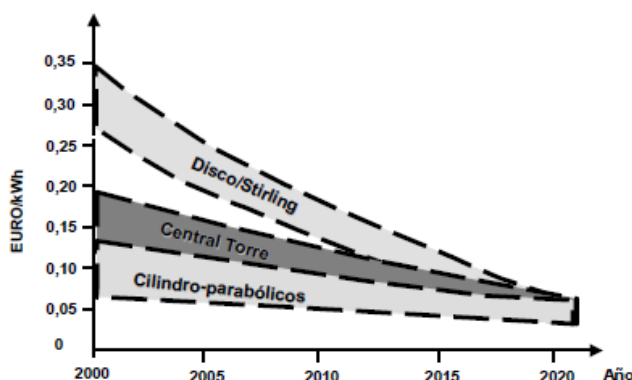


Fig. 2.4. Evolución prevista del coste de la electricidad en el periodo 2000-2020 producida para las tres tecnologías de CST (Agencia Internacional de la Energía-Solar PACES)

España ocupa un lugar de privilegio en tecnologías de heliostatos y concentradores cilindro-parabólicos, así como en mecanismos de seguimiento solar, por tanto, la posibilidad de implantación de este tipo de tecnologías es bastante elevada.

2.1.3.6. Energía de los mares y océanos.

Se podría distinguir tres clases de EERR relacionadas con los mares y océanos. Sobre la superficie de mares y océanos, los vientos son capaces de generar olas que alcanzan los 12 metros de altura, el aprovechamiento del movimiento oscilante de las olas da lugar a un tipo de energía denominada *undimotriz*. En el fondo de mares y océanos (a 20 metros de profundidad) las diferencias de temperatura (que pueden variar de -2°C a 25°C) permitirían generar energía eléctrica a partir de una máquina térmica, este tipo de energía se denomina *energía maremotérmica*. La energía de las *corrientes marinas o eólica marina* aprovecha la energía cinética contenida en las corrientes marinas para la generación de energía eléctrica; finalmente, tanto en la superficie como en el fondo, las fuerzas de atracción gravitacional producen mareas, la diferencia de altura que se genera



a consecuencia de la bajamar y pleamar posibilita realizar un aprovechamiento similar a las centrales hidráulicas, en este caso la energía se denomina *mareomotriz*.

Según el PANER 2011-2020, la energía eólica marina presenta una problemática tecnológica particular asociada a la inmadurez y complejidad de este segmento: mayores costes de inversión, mayor logística constructiva, elevados costes de operación y mantenimiento, y a la necesidad de estudios de detalle en entornos socio-medioambientalmente sensibles y en condiciones climáticas adversas. A ello se une la escasez de zonas del litoral español con profundidades marinas adecuadas para la tecnología actual en los parques en servicio –batimetrías menores de 50 m-, lo que limita en extremo el desarrollo de esta tecnología en el litoral español, a pesar de las aparentemente vastas zonas disponibles en el dominio público marítimo-terrestre.

2.1.3.7. Energía geotérmica.

Un tipo de energía que permite aprovechar otra fuente inagotable de energía y que no es muy conocido fuera del ámbito de la investigación en EERR es la *energía geotérmica*, utiliza el calor proveniente de cámaras magmáticas situadas en el interior de la Tierra (a kilómetros de profundidad) que contienen rocas a varios cientos de grados centígrados. Las zonas en las que coinciden capas rocosas porosas e impermeables que permiten captar agua y vapor de agua a altas condiciones de temperatura y presión y, que además logran evitar su salida hacia la superficie se denominan yacimientos geotérmicos. Se pueden distinguir tres tipos de campos o yacimientos geotérmicos en función de la temperatura que alcanza el agua: energía geotérmica de alta temperatura (entre 150 °C y 400 °C); de temperaturas medias (entre 70 °C y 150 °C); y de baja temperatura (entre 20 y 80 °C).

2.1.3.8. Energía eólica.

La *energía eólica* se fundamenta en el fenómeno conocido como viento, el viento se produce a consecuencia de las corrientes de aire generadas a causa del desigual calentamiento de la superficie de la tierra. El hecho de que el flujo de radiación solar incidente no es uniforme implica que unas zonas se calienten más que otras, provocando



movimientos convectivos de la masa atmosférica. El aire caliente asciende, arrastrando aire más frío proveniente de una región próxima, al subir se enfría, por lo que aumenta su densidad, descendiendo para volver a repetir el ciclo.

Para generar la energía eólica se utilizan unas turbinas eólicas comúnmente denominadas aerogeneradores. Se distinguen principalmente dos tipos de configuraciones de aerogeneradores: de eje horizontal y de eje vertical. Los más extendidos son los aerogeneradores de eje horizontal debido principalmente a su mayor rendimiento y mayor velocidad de rotación.

Se podrían clasificar las aplicaciones de la energía eólica en tres grupos; producción de energía eléctrica, transformación en trabajo y otras aplicaciones industriales. Es el primer grupo el que está alcanzando un mayor grado de madurez y consistencia, ya sea para sistemas conectados a la red de evacuación como en sistemas independientes o aislados. El segundo y tercer grupo todavía continúan manteniendo cierto interés; en la actualidad se utiliza para generar potencia eléctrica a pequeña escala y dotar de energía eléctrica a pequeños receptores de fuerza motriz.

Las instalaciones de energía eólica admiten otro modo de clasificación dependiendo de la potencia eléctrica que son capaces de generar; se denominan instalaciones eólicas de baja potencia aquellas que suministran una potencia del orden de decenas de kilovatios (kW), de media potencia aquellas que alcanzan una potencia nominal de algunos cientos de kW y, de elevada potencia aquellas que son capaces de alcanzar el rango unitario del megavatio (MW).

2.1.4. Problemática de la localización de instalaciones de EERR

Entre las diversas cuestiones a considerar para llevar a cabo la implantación de una instalación de EERR, destaca la ubicación de la misma puesto que, la inversión necesaria para acometer cualquier instalación de esta índole es de tal envergadura que, un mínimo error de planificación puede ocasionar graves perjuicios tanto económicos como medioambientales.



En la actualidad los criterios de decisión que tiene en cuenta un promotor de EERR que desee llevar a cabo la implantación de una central generadora de energía eléctrica con el objetivo de poder verter dicha energía a la red de distribución, son escasos e incluso en ocasiones, nulos. Escoger una correcta ubicación es primordial y para este tipo de instalaciones la disponibilidad del terreno no es lo más importante ya que, en ocasiones se ha comenzado a desarrollar la instalación de plantas generadoras en zonas en las que por diversas razones (medioambientales, técnicas, etc.) su ejecución posterior ha resultado inviable. En tales casos, si se hubiera analizado previamente con un cierto grado de profundidad y de detalle la zona prevista para su ubicación, se habría podido afirmar que dicha zona no cumplía la totalidad de requisitos necesarios para el desarrollo y posterior ejecución de una planta de EERR.

Como punto de partida en la búsqueda de emplazamientos habría que tener en cuenta una serie de criterios restrictivos los cuales permitan, limitar la zona de estudio a aquellos emplazamientos que cumplan con la normativa y directrices en vigor como por ejemplo, cumplimiento de distancia a infraestructuras existentes (redes viarias o ferroviarias), separación de las zonas que entrañen riesgo de inundaciones (cauces y ramblas), alejamiento de las bandas de protección de zonas protegidas (de alto interés paisajístico, arqueológico, paleontológico, etc.). La normativa en vigor permite definir cuáles son los criterios restrictivos que se deben considerar a la hora de implantar cualquier infraestructura y, ya no sólo a nivel de instalaciones de EERR sino en cualquier otro ámbito o sector (edificación privada, construcción agrícola, etc.)

Aunque los criterios restrictivos permiten delimitar la zona de estudio, resulta necesario considerar otra serie de criterios que influirán en la decisión de selección de los emplazamientos óptimos. La elección de tales criterios está directamente relacionada con el tipo de infraestructura a instalar es decir, no obedecen a ninguna normativa en vigor sino que son factores que presentan un determinado peso en función del tipo de infraestructura a realizar. Por ejemplo, en la búsqueda de emplazamientos óptimos de una central solar fotovoltaica, un factor a tener en cuenta será poseer un elevado potencial de radiación solar en cambio, para buscar un emplazamiento adecuado de un parque eólico el potencial solar no es un factor influyente mientras que disponer de una



velocidad medida de viento adecuada si es un factor muy a tener en cuenta. Por tanto se hace imprescindible distinguir de entre las diversas instalaciones de EERR, aquellas en las que por sus propias características su ubicación requiere estar previamente definida, del resto de instalaciones en las que para ubicarlas en un emplazamiento óptimo es inevitable realizar una evaluación de la totalidad de criterios que intervienen en la decisión.

Resulta posible establecer una clasificación de EERR en función a la ubicación de sus instalaciones, en tal caso se podrían distinguir dos grupos; Un primer grupo estaría compuesto por aquellas instalaciones de EERR que requieren una situación concreta y claramente definida por lo que su emplazamiento obedece sobre todo a características concretas del entorno en las que uno o más criterios presentan una importancia muy superior al resto. Formarían parte de ese grupo las EERR tales como biomasa, biogás, biocombustibles, energía geotérmica, energía de los mares y océanos y energía hidráulica. El segundo grupo lo formarían aquellas instalaciones de EERR en las que elegir correctamente el emplazamiento también es una cuestión primordial y, esta elección está sujeta a mayor indefinición a consecuencia de que entre los criterios que intervienen en la decisión, no hay uno o más criterios cuyo peso sea tan superior a los demás que permita descartar al resto y no tomarlos en consideración. Este segundo grupo estaría englobado por la energía solar fotovoltaica, solar termoeléctrica y eólica y será el grupo en el que se centrará la presente Tesis.

A la hora de seleccionar la correcta ubicación de una instalación de este segundo grupo, resulta necesario valorar una serie de criterios que influirán en mayor o menor medida en la correcta implantación de la instalación y su posterior desarrollo. Por ejemplo, si se pretende que las instalaciones viertan la energía generada a la red de distribución, será necesario disponer de acceso a la misma en las proximidades de la zona de actuación, de igual modo, para favorecer la ejecución de la instalación será conveniente disponer de una red de infraestructuras también cercanas, si se desea que la instalación tenga una determinada capacidad instalada, ésta necesitará una superficie o área mínima para poder ejecutarse, etc. La consideración y valoración de los criterios mencionados (cercanía a redes de distribución e infraestructuras, superficies, etc.) junto con otra serie



de criterios que, variarán en función de la tecnología o instalación a implantar, será un requisito indispensable para poder evaluar con fiabilidad las distintas ubicaciones y, de esta forma, poder obtener los emplazamientos adecuados para cada una de las instalaciones de EERR objeto de estudio y, es aquí donde se enmarca la presente Tesis Doctoral.

2.1.5. EERR en la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia (CARM).

2.1.5.1. Marco legislativo.

El empleo de las EERR constituye una línea prioritaria en la planificación de las políticas energéticas de los diferentes gobiernos. En la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia (CARM), la Planificación Energética Regional 2003/2012 propone que las fuentes de energía renovable alcancen en ese periodo una aportación del 13% de toda la energía primaria consumida en la Región.

Con el convencimiento de que el uso de las EERR suponía una vía inestimable para dar solución a las necesidades de abastecimiento energético y de combatir los problemas inherentes al cambio climático, se impulsó en la CARM en el año 2006, la Ley 10/2006, de Energías Renovables y Ahorro y Eficiencia Energética, en la misma, se establecía el principio de primacía de las EERR, mediante el cual se les otorgaba un carácter prioritario para vencer las barreras que dificultaban su expansión. Para ello, se definieron directrices, planes y programas de impulso que fomentaban el desarrollo y crecimiento de las EERR. Entre las diversas EERR susceptibles de aprovechamiento en la Región de Murcia destacan la energía solar termoeléctrica, solar fotovoltaica, eólica terrestre y la biomasa procedente de residuos (forestales, agrícolas, ganaderos, de la industria agroalimentaria o urbanos) o de cultivos energéticos.

Un año después, se aprobó la Ley 13/2007 en la que se adoptaban medidas urgentes en materia de medio ambiente, solucionando la problemática de tener que someter a evaluación de impacto ambiental aquellas instalaciones de EERR y, en concreto de energía solar térmica, fotovoltaica y energía eólica que ocupaban una superficie superior a 5.000 m² ya que, tal sometimiento suponía aumentar la complejidad y duración de las

gestiones administrativas necesarias para obtener el acta de puesta en marcha de cada instalación. De esta forma, restringe el sometimiento del proyecto a evaluación de impacto ambiental a las instalaciones que lo requieran a consecuencia de sus dimensiones o volumen de producción, estas son las instalaciones de energía solar con potencia térmica superior a 20 MW (o con una superficie ocupada superior a 100 ha), y los parques eólicos que tengan veinticinco o más aerogeneradores o que se encuentren a menos de dos kilómetros de distancia entre ellos. También se eliminó la gestión relativa al acta de puesta en marcha y funcionamiento de la actividad por corresponder al órgano sustantivo, y no al ambiental, la verificación de la adecuación de la actividad a las prescripciones de la evaluación o calificación ambiental antes de su inicio.

2.1.5.2. EERR en la CARM destinadas a la generación de energía eléctrica

En la figura 2.5 se muestran las producciones de potencia instalada con EERR en la región de Murcia; en ella se observa que las mayores producciones corresponden a los sectores solar y eólico.

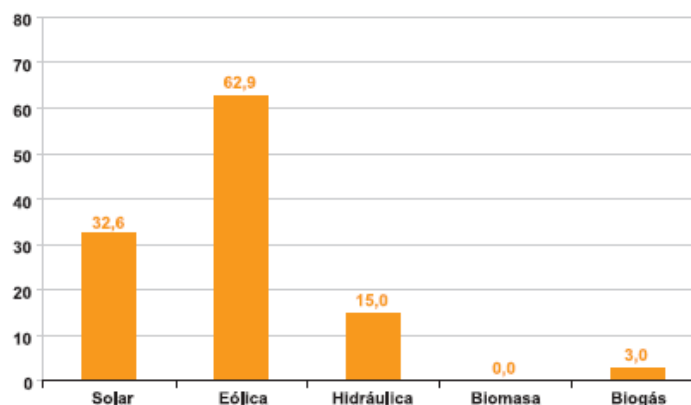


Fig. 2.5. Potencia total instalada en la región de Murcia para diferentes EERR en 2007 (MW).

Nota: Considerando únicamente expedientes legalizados hasta marzo de 2008. (Comisión Nacional de la Energía)

La potencia instalada corresponde al valor máximo que una instalación generadora puede alcanzar en condiciones ideales es decir, aquella que se alcanzaría si la



instalación funcionase a plena capacidad y sin ningún condicionante que disminuyese su rendimiento. Cualquier instalación y con mayor probabilidad aquellas cuya fuente de energía es renovable, depende de las características de su entorno; por ejemplo aunque un huerto solar fotovoltaico posea una capacidad instalada de 1 MWh, no implica que esté generando hora a hora de forma ininterrumpida esa energía durante el transcurso de su ciclo de vida, habría que considerar otros factores tales como horas de insolación, rendimiento de los equipos, días nublados, etc. Por tanto resulta lógico modificar el criterio de potencia total instalada por el de energía eléctrica generada o vertida a red. (Figura 2.6.)

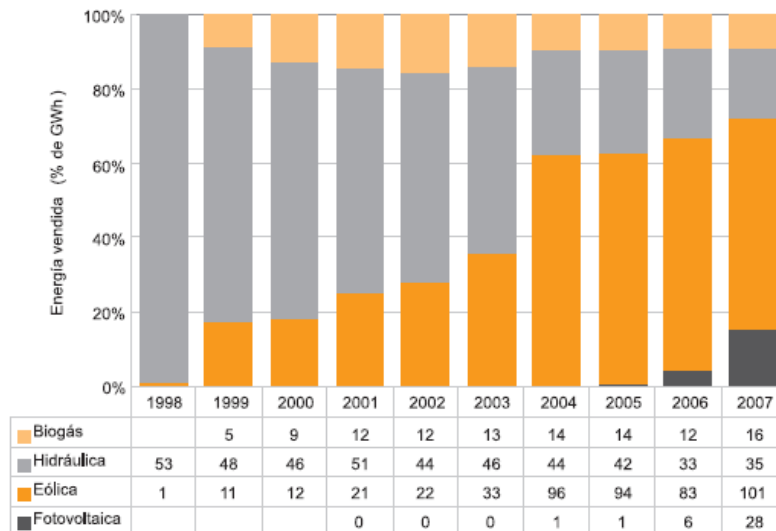


Fig. 2.6. Evolución de la energía vendida de fotovoltaica, eólica, hidroeléctrica y biogás en la Región de Murcia. Porcentaje de GWh sobre el total. Nota: Considerando únicamente expedientes legalizados a marzo de 2008. (Comisión Nacional de la Energía)

Según se aprecia en la figura 2.6, aunque la energía hidráulica ha sido la tecnología renovable con mayor tradición en la región, a consecuencia de las constantes sequías su peso ha ido decreciendo en importancia y con el paso del tiempo se prevé que su aportación sea cada vez menor.



De igual modo se observa que el porcentaje de energía vendida de biogás no permite vislumbrar un notable crecimiento, su aportación se ha mantenido prácticamente constante en los últimos años.

También es de destacar que las tecnologías renovables que experimentan un mayor crecimiento son la energía solar fotovoltaica y la energía eólica. Su elevada expansión ha sido debida al marco legislativo favorable que se ha ido desarrollando en la última década. También y, aunque en las figuras anteriores no aparece reflejada, la energía solar termoeléctrica se ha ido confirmando como la tercera aportación renovable en la región de Murcia.

2.1.5.3. Estado actual y perspectivas futuras.

La región de Murcia dispone de un extraordinario potencial de desarrollo e implantación de instalaciones de EERR, no obstante, hay que tener en cuenta que la principal fuente de energía de origen renovable es la propia naturaleza y por lo tanto es algo que viene dado de antemano (Gómez López, M.D. et al, 2010). Partiendo de esta premisa, parece lógico indicar que la región de Murcia no reúne las condiciones óptimas para implantar la totalidad de las diferentes tecnologías de origen renovable existentes en el panorama actual. A continuación se describirán cada una de las EERR existentes en la actualidad profundizando en aquellas que puedan presentar mayor acogida en la Región de Murcia.

Biomasa

Dadas las características de la Región de Murcia, el principal aprovechamiento de la biomasa procederá de los residuos forestales y agrícolas. Una prueba del potencial de la biomasa es que según el Centro Regional de Estadística de Murcia, en el año 2006 existían 109.700 hectáreas de cultivos herbáceos, 211.625 hectáreas de cultivos leñosos y 276.709 hectáreas de terreno forestal. Si se aprovechara todo ello, se obtendrían niveles extraordinarios de biomasa, en tales circunstancias el potencial energético en biomasa en términos de toneladas equivalentes de petróleo (tep) en la Región de Murcia sería el indicado en la tabla 2.3.

TIPO	POTENCIA (tep)
Cultivos leñosos	82.534
Cultivos herbáceos	110.577
Biomasa forestal	39.486
TOTAL	232.957

Tabla 2.3.- Potencial energético en biomasa de la Región de Murcia

Respecto al potencial de los cultivos en la región, la Agencia de Gestión de la Energía de la Región de Murcia elaboró un plano (Figura 2.7) en el que se indicaban las distribuciones potenciales de residuos agrícolas.

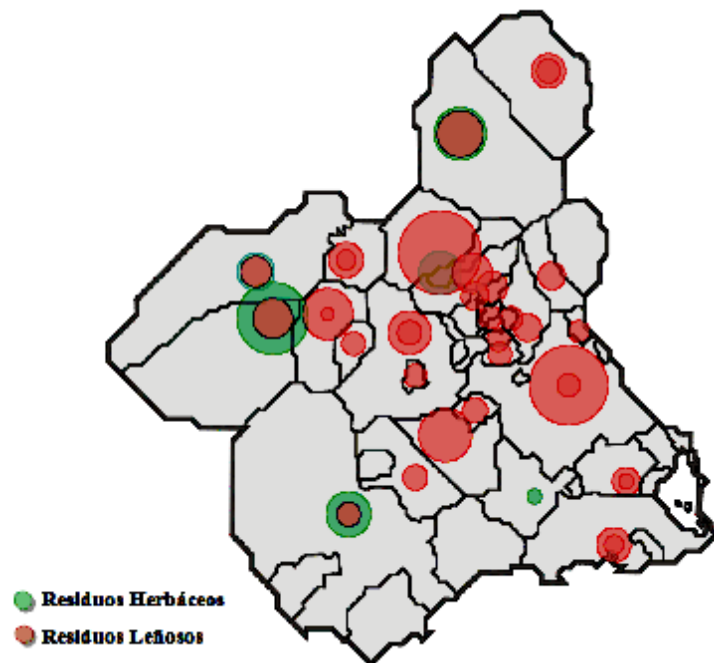


Fig. 2.7. Mapa de distribuciones potenciales para biomasa en la Región de Murcia (Gómez-López, M.D. et al, 2010)

Aunque según se observa en la figura anterior existen numerosas zonas donde se podría aprovechar esta fuente de energía, su uso en la actualidad está muy extendido a aplicaciones de índole térmico. Además se hace necesario destacar que en las políticas energéticas de la CARM, el aprovechamiento de la biomasa para generación de energía eléctrica no constituye una de las líneas prioritarias de actuación.



Biogás

Se podría estimar cuál sería la producción de biogás a partir del crecimiento de los residuos y del grado de tratamiento de éstos. Para cada uno de estos residuos se debería realizar la conversión al biogás de la forma indicada en la tabla 2.4.

<i>Residuo</i>	<i>Biogás (m³/t)</i>
RSU	48-144 ⁽¹⁾
Lodos de EDAR	85-110 ⁽¹⁾
Residuos Industriales	90-256 ⁽¹⁾
Purín de cerdo	165-320 ⁽¹⁾
Gallinaza	130-200 ⁽¹⁾
Purín de bovino, ovino y caprino	150 ⁽²⁾

Tabla 2.4.- Valores de rendimientos en términos de Biogás de los diferentes residuos
(⁽¹⁾ Hobson, P.N. 1990, (⁽²⁾ Borrador del plan energético de la Región de Murcia)

Si se gestionaran la totalidad de los residuos generados en la Región de Murcia (RSU, lodos de EDAR, residuos agroindustriales y ganaderos) y, se obtuviera biogás de la totalidad ellos y éste fuera utilizado para generación de energía eléctrica se producirían 1.900 GWh. (Tabla 2.5.)

<i>Residuo</i>	<i>Energía generada (GWh)</i>
RSU	103,44
Lodos de EDAR	44,55
Residuos agroindustriales biodegradables	43,05
Residuos ganaderos	1.709,00
TOTAL	1.900,04

Tabla 2.5.- Valores de potencial anual de biogás en la Región de Murcia en GWh
(Gómez-López, M.D. et al, 2010)

Aunque según los datos indicados el aprovechamiento de biogás en la Región de Murcia es de un interés notable, existen en la actualidad barreras de carácter normativo (Real Decreto 661/2007, Real Decreto-Ley 6/2009 y PER 2005-2110) que impiden su utilización para generación de energía eléctrica; Según el informe elaborado por la



Asociación Española de Biogás (AEBIG) en el año 2010, la implantación de esta tecnología para generación de energía eléctrica presenta en la actualidad una serie de inconvenientes que no favorecen su puesta en funcionamiento, entre dichos inconvenientes destacan los siguientes:

- La existencia de dos tramos tarifarios en la actual legislación, no favorece la viabilidad de plantas de pequeña escala.
- La inversión a realizar es muy superior a la contemplada en el PER 2005-2010
- Inexistencia de acuerdo en el reparto de costes y gastos, como consecuencia de la ejecución de las instalaciones de conexión a las redes de distribución.
- Creación de un registro de preinscripción, con condiciones gravemente limitadoras para el desarrollo del biogás, que hacen que su implantación sea prácticamente imposible

Todos los inconvenientes citados anteriormente constituyen un obstáculo difícil de solventar por tanto, aunque la Región de Murcia posea unos índices de aprovechamiento energético con Biogás, su aplicación para generación de energía eléctrica presenta en la actualidad bastante incertidumbre.

Biocombustibles

En la Región de Murcia, los objetivos específicos en términos de producción de biocombustibles eran de 220.000 tep para el 2010. Aunque en el año 2004 la producción era de 51.200 tep, con la posterior creación de una planta de biodiesel con una producción superior a 250.000 tep se conseguía superar el objetivo marcado.

La ubicación de las plantas de producción de biocombustibles obedece más a una situación estratégica en función al uso que se vaya a realizar y al acopio de las materias primas que a la proximidad con el origen de las mismas, por ello este tipo de plantas se suelen ubicar en grandes extensiones industriales próximas tanto a refinerías (por su aplicación como aditivo de gasolinas), como a infraestructuras de transporte aéreo, marítimo y terrestre muy consolidadas.



Energía geotérmica

En la Región de Murcia, a través del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) se consiguieron detectar importantes yacimientos geotérmicos de baja temperatura (Inventario General de Manifestaciones Geotérmicas, 1972), las temperaturas registradas en estos yacimientos son inferiores a 50 °C. A consecuencia de las bajas temperaturas de los flujos geotermales las aplicaciones son muy limitadas, quedando prácticamente restringidas a la obtención de agua caliente en instalaciones del sector terciario (balnearios, etc.).

Energía de los mares y océanos

Aunque a nivel nacional se han realizado ensayos sobre plantas piloto experimentales con el objetivo de generar energía eléctrica para su posterior vertido a la red de distribución (p.e.: Costa de Santoña en Cantabria), su viabilidad en la Región de Murcia está por el momento en una fase de estudio bastante preliminar y no se prevén importantes avances en un futuro inmediato.

Energía hidráulica

Respecto a este tipo de EERR resulta necesario remarcar lo siguiente; si además de considerar las características climatológicas y orográficas desfavorables en la Región de Murcia (escasas precipitaciones y ausencia de desniveles importantes en las proximidades de las cuencas), se tiene en cuenta la sobreexplotación de sus acuíferos, se vislumbra un horizonte bastante pesimista en orden a implantar futuras infraestructuras hidráulicas.

No obstante, en la actualidad existen diversas instalaciones en marcha, de las denominadas minihidráulicas ($1 \text{ MW} < P < 10 \text{ MW}$), localizadas en su mayoría en conducciones de riego. Aunque también se pueden encontrar otras instalaciones en situación de parada por diversos motivos en las que no se prevé una nueva puesta en funcionamiento.

Por tanto, existiendo otras EERR de más fácil ejecución, no se han alcanzado los objetivos previstos en la Región de Murcia para el año 2010 (22 MW) ni se prevé que aumente el número de este tipo de instalaciones en un futuro próximo.

Energía solar fotovoltaica

El sureste de España y concretamente la Región de Murcia se ha convertido en una de las principales zonas en las que se han implantado mayor número de plantas de generación solar fotovoltaica comúnmente denominadas huertos solares. Entre las diversas causas de este auge cabría destacar que Murcia posee uno de los más altos niveles de potencial o radiación solar del país ya que, la radiación global media anual en la mayor parte de su territorio supera los 5.00 kWh/m²-día, (Vera García F, et al 2007). En la figura 2.8 se observan los principales valores de radiación solar diaria en la Región de Murcia:

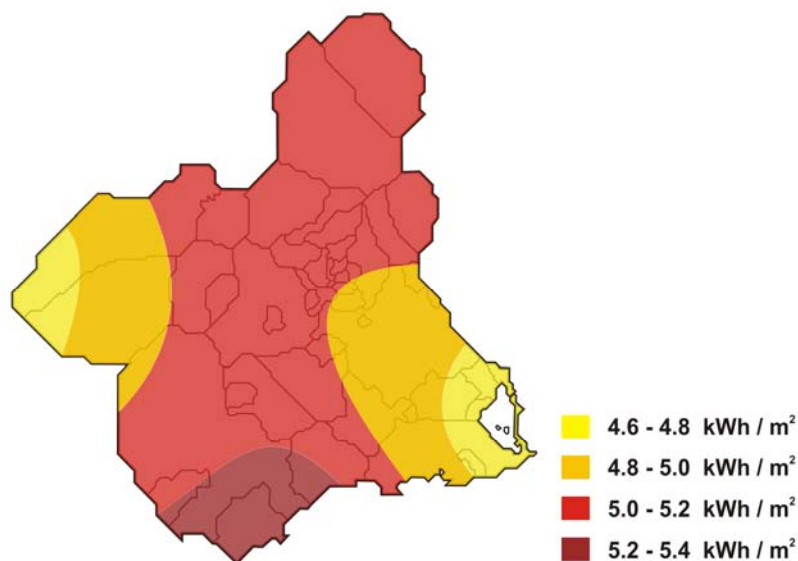


Fig. 2.8. Principales valores de radiación solar diaria expresados en kWh/m²
(Instituto nacional de meteorología)

El potencial solar bruto viene determinado por las horas de sol y por la latitud, no obstante existen condicionantes que pueden limitar la expansión y crecimiento de las instalaciones solares fotovoltaicas (superficie disponible, proximidad a las redes de evacuación, etc.). También resulta necesario considerar otros factores relacionados con

dichos condicionantes como, por ejemplo, la superficie requerida para implantar un huerto solar, este tipo de plantas de generación necesitan disponer de bastante superficie, resultando por tanto un factor a considerar tanto desde el punto de vista de la extensión disponible como de la calificación de éste (industrial, no urbanizable, etc.). Por ello, las líneas de investigación deben ir dirigidas a optimizar cada instalación en función de aquellos factores que condicionan su correcta ejecución y posterior desarrollo.

Energía solar de alta temperatura con conexión a red (Termoeléctrica)

Según la Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Región de Murcia, en el transcurso de estos últimos años, se han ido realizando numerosas solicitudes para implantar este tipo de tecnologías alcanzando 421,7 MW de potencia solicitada, no obstante, debido a que la tramitación de estas instalaciones es lenta, hasta el año 2011 únicamente había una planta operativa en la Región (figura 2.9.)

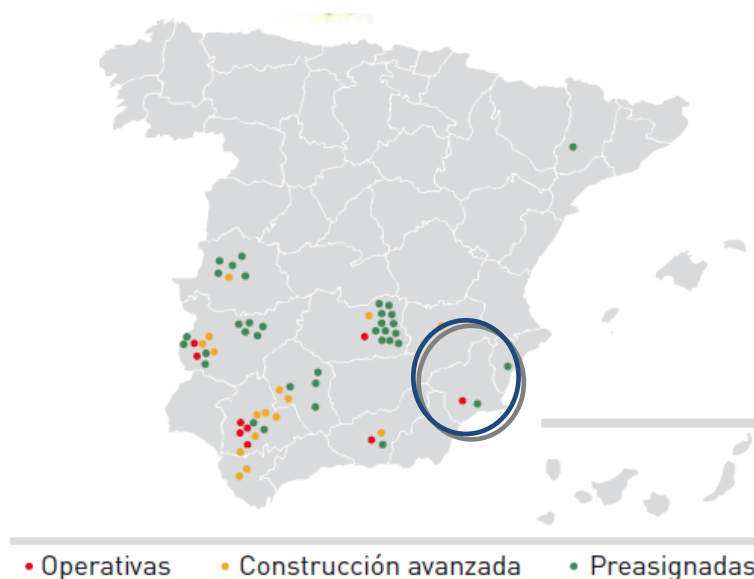


Fig. 2.9. Localización de centrales solares termoeléctricas en España (IDAE, 2011)

Al igual que ocurriría con las instalaciones solares fotovoltaicas e incluso aquí con mayor importancia debido a la envergadura de este tipo de centrales, la superficie requerida junto con la proximidad a las redes de evacuación, suponen factores esenciales, por

tanto, las líneas de investigación indicadas para instalaciones solares fotovoltaicas marcan también las pautas a seguir en las centrales solares termoelectricas.

Energía eólica

En la Región de Murcia, se comenzaron a realizar diversos estudios sobre el potencial eólico a partir del año 1999, el último estudio realizado se llevó a cabo en el año 2009 a través del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), organismo dependiente del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Los informes finales del consultor que realizó el estudio permitieron desarrollar un mapa de densidad de potencia eólica en términos de W/m^2 (Figura 2.10) en el que se muestra la densidad de potencia eólica media anual a una altura de 80 metros en las diversas zonas de la región.

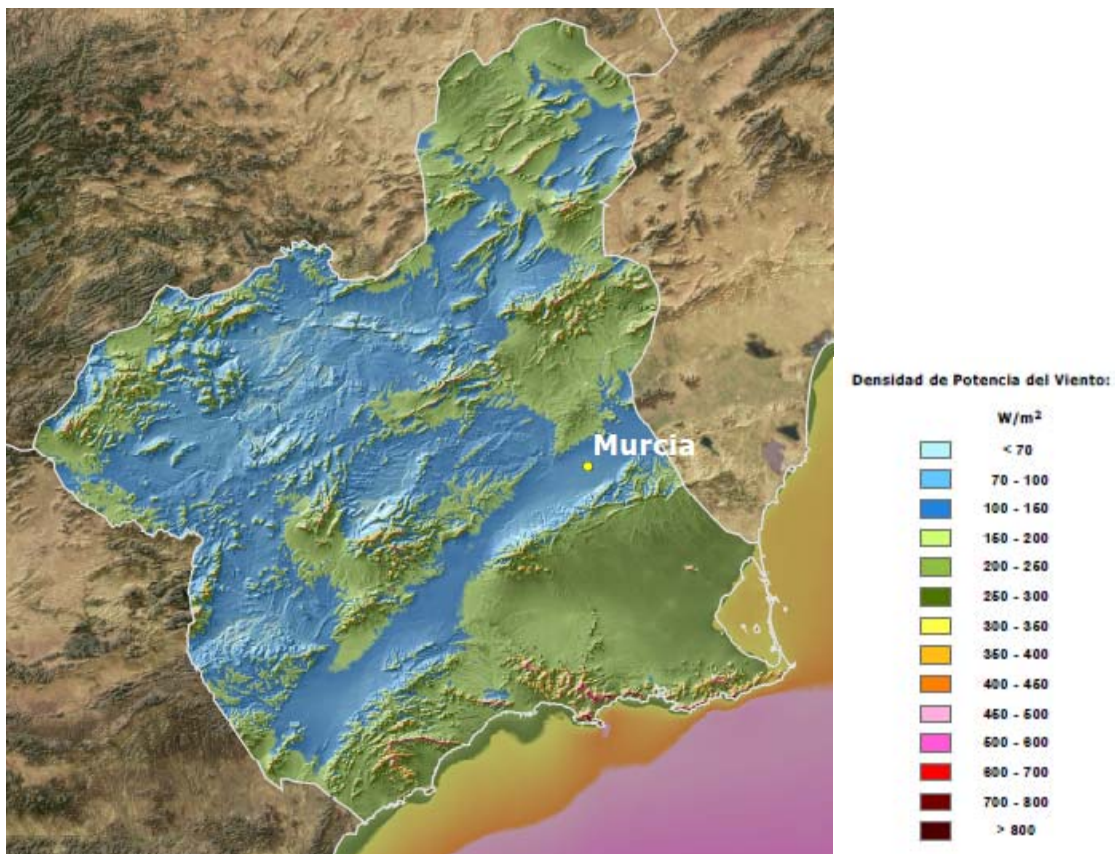


Fig. 2.10. Mapa de densidad de potencia eólica media anual (W/m^2) a 80 metros de altura en la Región de Murcia (IDAE, 2010)



Observando la Fig. 2.10 se pueden apreciar que existen tres zonas bastante diferenciadas: Altiplano, Noroeste y Costa. Tomando como referencia la figura anterior y considerando una tecnología de aerogenerador resulta posible indicar las previsiones de aprovechamiento de energía eólica para el año 2012 (Tabla 2.6).

<i>ZONA EÓLICA</i>	<i>POTENCIAL A 2012 (MW)</i>
Altiplano	350
Noroeste	350
Costa y resto de la Región	150
TOTAL	850

*Tabla 2.6.- Previsiones de aprovechamiento de energía eólica de la Región de Murcia
(Agencia de Gestión de la Energía de la Región de Murcia-ARGEM)*

A pesar del alto potencial de la zona de costa indicado en la figura 2.10, la energía aprovechable es mucho menor que en el Noroeste a causa de la limitación de espacio que supone el alto nivel de ocupación urbanística y residencial de esta zona. Por ello, sería de gran utilidad realizar un estudio con mayor grado de precisión que permitiera obtener de entre las diversas zonas cuales serían factibles para implantar una instalación eólica.

2.1.6. Caso de estudio: Localización de instalaciones de energías renovables en el Litoral de la Región de Murcia.

2.1.6.1. ¿Qué instalaciones de EERR serán objeto de estudio? ¿Por qué?

Aunque en los apartados anteriores se ha ido desarrollando la situación actual de las diferentes tipos de EERR y, al mismo tiempo esbozando la problemática que presenta su implantación en la Región de Murcia, a continuación se procederá a seleccionar de entre los diversos tipos aquellas que serán objeto de la presente Tesis Doctoral.

Con carácter previo, habría que destacar que de los distintos tipos de fuentes de energía con origen renovable descritos hay especialmente dos de ellos que, tanto por las propias características de la Región (principalmente climatológicas y orográficas) como por la



escasa experiencia y madurez de la tecnología, sería conveniente descartar: La *energía hidráulica* y la *energía de los mares y océanos* respectivamente.

Entre las diversas aplicaciones que ofrecen las EERR, el presente estudio se desea enfocar en aquellas cuya objetivo es la generación de energía eléctrica para su posterior vertido a la red de distribución, esta finalidad implica descartar aquellas EERR cuya finalidad sea distinta: los biocombustibles, la biomasa, energía solar térmica de baja temperatura y energía geotérmica. Los motivos que obligan a realizar tal descarte se han desarrollado con importante grado de detalle en el propio análisis de cada tipo de tecnología, no obstante se procederá a su enumeración de forma breve y concisa:

- *Biocombustibles*: Su aplicación está dirigida hacia el sector del transporte no utilizándose este tipo de energía para generación de energía eléctrica.
- *Biomasa*: Su desarrollo se ha centrado principalmente en aplicaciones de índole térmico, las políticas energéticas de la región no van dirigidas a su aprovechamiento en generación de energía eléctrica y, existente en la actualidad problemas latentes en su implantación (tecnología inmadura, sector desorganizado, etc.).
- *Energía solar térmica de baja temperatura*: De manera análoga a lo anteriormente expuesto en las conclusiones obtenidas en biocombustibles se puede aplicar para esta tecnología, con la salvedad de que la aplicación en este caso se desarrolla en los sectores industrial, terciario y residencial. Su uso está enfocado principalmente a la generación de agua caliente sanitaria y calefacción, ya que las temperaturas alcanzadas imposibilitan el aprovechamiento de este tipo de tecnología para generación de energía eléctrica.
- *Energía Geotérmica*: Para que en este tipo de tecnología fuera susceptible su aprovechamiento con el objetivo de generar energía eléctrica, las temperaturas deberían ser superiores a 150°C mientras que, en la Región de Murcia las temperaturas alcanzadas en los distintos yacimientos geotérmicos no superan los 50 °C.



El *Biogás* es un tipo de EERR susceptible de aprovecharse para la generación de energía eléctrica, no obstante, por los graves inconvenientes de carácter normativo desarrollados con anterioridad (insuficiencia de tarifas, costes de inversión elevados, problemas de conexión a las red de distribución, etc.) y, que aún se deben de solventar, implica que resulte necesario dejar al margen en el presente estudio dicha tecnología.

Una vez expuestos los motivos y justificaciones de los descartes, las tipos de instalaciones de EERR restantes son los siguientes:

- Energía solar fotovoltaica
- Energía solar térmica de alta temperatura (termoeléctrica)
- Energía eólica

Éstas constituirán las instalaciones de EERR objeto de la presente Tesis y sobre las cuales se llevará a cabo el análisis de búsqueda y selección de emplazamientos óptimos. Al estimar como requisito fundamental la generación de energía eléctrica para su posterior vertido a red, resulta conveniente establecer cuales serán las superficies mínimas a considerar y de qué potencias instaladas mínimas se pretende partir en cada una de las instalaciones objeto de análisis.

Las plantas de energía solar fotovoltaica y termoeléctrica cuyo objetivo es la generación de energía para verterla a la red de distribución, pueden presentar diversos tamaños en función de la potencia instalada, en este tipo de huertos solares, se considerará como punto de partida una potencia instalada de 100 kWp de forma que las superficies requeridas para implantar un huerto solar deben de ser tales que, permitan instalar al menos la potencia instalada indicada. El hecho de establecer este valor es debido a que ha sido el utilizado en la mayoría de normativas (RD 436/2004, RD 661/2007, etc.) con sistemas de primas o subvenciones para estos tipos de tecnologías.

De igual modo a lo indicado para plantas solares fotovoltaicas y termoeléctricas, el baremo utilizado para determinar la potencia instalada mínima en parques eólicos será, el indicado en la normativa de referencia que establece el sistema de primas y subvenciones para dicha tecnología (Real Decreto 436/2004), en la misma se muestran



dos tipos diferentes de primas en función de si la potencia es inferior o superior a 5 MW, resultando más ventajosa la prima por implantación de parques eólicos de potencias inferiores a 5MW. Por ello, se estima como punto de partida una potencia generada de 5 MW de forma que, aunque actualmente existen en el mercado aerogeneradores que están próximos a alcanzar dicha potencia, con la implantación de únicamente dos aerogeneradores convencionales se podría alcanzar la potencia prevista. Por tanto, las superficies requeridas para implantar un parque eólico deben de ser tales que, permitan implantar al menos dos aerogeneradores convencionales.

2.1.6.2. ¿Cuál será la zona objeto de estudio?

Partiendo de la clasificación definida en el apartado 2.1.4.3. del presente capítulo, las instalaciones de EERR objeto de este estudio (energía solar fotovoltaica, solar termoeléctrica y eólica) estarían clasificadas en el segundo grupo ya que, se trata de instalaciones de EERR en las que elegir correctamente el emplazamiento es una cuestión primordial y, esta elección está sujeta a mayor indefinición a consecuencia de que entre los criterios que intervienen en la decisión, no hay uno o más criterios cuya importancia sea tan superior a los demás que permita descartar al resto y no tomarlos en consideración.

El territorio de la Región de Murcia está dividido en tres zonas claramente diferenciadas: Altiplano, Noroeste y Costa. Entre las zonas indicadas, para llevar a cabo una búsqueda exhaustiva de emplazamientos óptimos con el objetivo de implantar instalaciones de EERR, la costa o el litoral es la que conlleva una mayor problemática a consecuencia de la limitación de espacio que supone el alto nivel de ocupación urbanística y residencial, por lo que realizar un estudio con mayor grado de precisión que permitiera obtener, dentro de dicha zona, cuáles serían los emplazamientos óptimos para albergar instalaciones de EERR supondría un importante avance de cara al desarrollo e implantación de este tipo de instalaciones. Por todo ello, se ha escogido como zona de estudio de la presente Tesis, el Litoral de la Región de Murcia siendo el estudio y análisis en profundidad de dicha zona la que permitirá obtener la localización de los emplazamientos óptimos de instalaciones de EERR.



2.2. Referencias bibliográficas del Capítulo II

Agencia de Gestión de la Energía de la Región de Murcia ARGEM (2008). *Borrador Plan Energético Regional*. Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.

Arrhenius, S. (1896). On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 5 (41), pp. 237-276.

Asociación Española de Biogás-AEBIG, (2010), *Futuro del biogás en España*. Madrid.

Parida, B. Iniyan, S. y Goic, R. (2011). A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, pp. 1625–1636.

Comisión de las comunidades europeas. (1996). *Energía para el futuro: fuentes de energía renovables. Libro verde para una estrategia comunitaria*. Bruselas.

Comisión europea. (1997). *Energía para el futuro: fuentes de energía renovables. Libro blanco para una estrategia y un plan de acción comunitarios*. Bruselas.

Comisión Nacional de la Energía. (2007). *Información básica de los sectores de la energía*. Madrid.

Framework convention on climatic change. (1997). *Report of the conference of the parties on its third session. Adoption of the Kyoto Protocol*, United Nations, Kyoto

Gómez-López, M.D., García-Cascales, M.S. y Ruíz-Delgado, E. (2010). Situations and problems of renewable energy in the Region of Murcia, Spain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, pp. 1253–1262.

Grupo intergubernamental de expertos sobre cambio climático. (1992). *Cambio Climático: Las Evaluaciones del IPCC de 1990 y 1992*. Organización Meteorológica Mundial / Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Canada.

Hobson, P.N., (1990), *The treatment of agricultural wastes in anaerobic digestion; a waste treatment technology*. In: Wheattly A, editor. *Critical reports on applied chemistry*, vol. 31.

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía IDAE. (2005). *Plan de Energías Renovables en España (PER) 2005-2010*. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Madrid.



Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía IDAE. (2010). *Plan de Acción Nacional de Energías Renovables de España (PANER) 2011 – 2020*. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Madrid.

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía IDAE. (2011). *Evaluación del potencial de energía solar termoeléctrica. Estudio Técnico PER 2011-2020*. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Madrid.

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía IDAE. (2010). *Estudio del recurso eólico y elaboración de un mapa eólico de España*. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Madrid.

Instituto Geológico Minero de España (1972). *Inventario General de Manifestaciones Geotérmicas*.

Ley 2/2011, de 4 de marzo, de Economía Sostenible.(2011). BOE nº 55, Gobierno de España. Madrid.

Ley 54/1997, de 27 noviembre del Sector Eléctrico.(1997). BOE nº 285, Gobierno de España. Madrid.

Ley 10/2006, de 21 de diciembre, de Energías Renovables y Ahorro y Eficiencia Energética de la Región de Murcia.(2007). BOE nº 111. Gobierno de España. Madrid.

Ley 13/2007, de 27 de diciembre, de modificación de la Ley 1/1995, de 8 de marzo, de protección del medio ambiente de la Región de Murcia, y de la Ley 10/2006, de 21 de diciembre, de Energías Renovables y Ahorro y Eficiencia Energética de la Región de Murcia, para la adopción de medidas urgentes en materia de medio ambiente. (2008). BOE nº 177. Gobierno de España. Madrid.

M. Socorro García-Cascales, M.S., Teresa Lamata, M & Sánchez-Lozano, J.M. (2012), Evaluation of photovoltaic cells in a multi-criteria decision making process, *Annals of Operations Research*. In press DOI 10.1007/s10479-011-1009-x

Parlamento Europeo. (2001). *Directiva 2001/77/CE del Parlamento Europeo y del Consejo relativa a la promoción de la electricidad generada a partir de fuentes de energía renovables en el mercado interior de la electricidad*, Bruselas.

Parlamento Europeo. (2003). *Directiva 2003/30/CE del Parlamento Europeo y del Consejo relativa al fomento del uso de biocarburantes u otros combustibles renovables en el transporte*, Bruselas.



Parlamento Europeo. (2009). *Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y por la que se modifican y se derogan las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE*, Bruselas.

Real Decreto 2818/1998, de 23 de diciembre, sobre producción de energía eléctrica por instalaciones abastecidas por recursos o fuentes de energía renovables, residuos y cogeneración. (1998). BOE nº 312, Gobierno de España. Madrid

Real decreto 436/2004, de 12 de marzo, por el que se establece la metodología para la actualización y sistematización del régimen jurídico y económico de la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial. (2004), BOE nº 75, Gobierno de España. Madrid

Real decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el código técnico de la edificación. (2006), BOE nº 74, Gobierno de España. Madrid

Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial. (2007). BOE nº 126, Gobierno de España. Madrid.

Real Decreto 1578/2008, de 26 de septiembre, de retribución de la actividad de producción de energía eléctrica mediante tecnología solar fotovoltaica para instalaciones posteriores a la fecha límite de mantenimiento de la retribución del Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, para dicha tecnología. (2008). BOE nº 234. Gobierno de España. Madrid.

Real Decreto-ley 6/2009, de 30 de abril, por el que se adoptan determinadas medidas en el sector energético y se aprueba el bono social.(2009). BOE nº 111, Gobierno de España, Madrid.

Real Decreto-ley 14/2010, de 23 de diciembre, por el que se establecen medidas urgentes para la corrección del déficit tarifario del sector eléctrico. (2010). BOE nº 312. Gobierno de España. Madrid.

Real Decreto-ley 1/2012, de 27 de enero, por el que se procede a la suspensión de los procedimientos de preasignación de retribución y a la supresión de los incentivos económicos para nuevas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de cogeneración, fuentes de energía renovables y residuos. (2012). BOE nº 24. Gobierno de España. Madrid.

Vera F., García J.R., Hernández Z. (2007). *Atlas de Radiación Solar y Temperatura Ambiente en La Comunidad Autónoma de la Región de Murcia*. Universidad Politécnica de Cartagena. ARGEM. Murcia.

Winter C.J., Sizmann R.L. & Vant-Hull L.L. (1991), *Solar Power Plants*. Springer-Verlag. Berlin.



Working Group I. (1990). *Climate Change. The IPCC Scientific Assessment*. Ed. J.T., Houghton, G.J. Jenkins & J.J. Ephraums, Cambridge University Press, Cambridge.

Working Group II. (1990). *Climate Change. The IPCC Impacts Assessment*, Ed. W.J. McG. Tegart, G.W. Sheldon and D.C. Griffiths, Australian Government Publishing Service, Camberra.

Working Group III. (1990). *Climate Change. The IPCC Response Strategies*. World Meteorological Organization/United Nations Environment Program. Island Press.



CAPÍTULO III

SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA





*“Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor,
la electricidad y la energía atómica: la voluntad”.*

Albert Einstein

CAPÍTULO III

SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

3.1. Sistemas de Información Geográfica. Introducción y objetivos.

3.1.1. Concepto general.

No resulta sencillo proporcionar una definición exacta y única de este tipo de sistemas, de hecho, la mayoría de los principales estudiosos de esta materia ofrecen definiciones diferentes, de entre ellas se han destacado las siguientes:

- Goodchild (1985): “Sistema que utiliza una base de datos espacial para generar respuestas ante problemas de naturaleza geográfica”.
- Aronoff (1989): “Conjunto de procedimientos manuales o computarizados, usado para almacenar y tratar datos referenciados geográficamente”.
- Felicísimo (2003): “Conjunto de software, hardware y periféricos que transforman datos referenciados geográficamente en información sobre localizaciones, interacciones espaciales y relaciones geográficas de las entidades fijas o dinámicas que ocupan un espacio en los entornos naturales o construidos”.
- Preciado (2004): “Herramientas informáticas, capaces de gestionar y analizar la información georreferenciada, con vistas a la resolución de problemas de base territorial y medioambiental”.

Analizando las definiciones anteriores se pueden extraer diversas connotaciones: el tipo de tecnología utilizada (de carácter informático), la documentación que se maneja (información georreferenciada), operaciones que se llevan a cabo (almacenamiento,



análisis, gestión, etc.) y finalmente el objetivo que se desea alcanzar (resolución de problemas territoriales, medioambientales, etc.).

En compendio, se podrían definir los Sistemas de Información Geográfica (SIG) -en lengua inglesa se denominan GIS (Geographic Information System)- como soportes informáticos (hardware y software) cuyos objetivos principales son el análisis, consulta, edición, almacenamiento y salida de datos espacialmente referenciados para resolver problemas complejos de planificación y gestión.

Coppock y Rhind (1991) resumieron en seis amplios conceptos las cuestiones a las que un SIG puede dar respuesta:

- 1) *Localización directa.* Constituye la primera y más elemental de las demandas que un SIG puede satisfacer. Consiste en conocer de manera rápida y eficaz cuáles son los atributos que corresponden a una determinada entidad geográfica. De ese modo, por ejemplo, se podría averiguar con sólo señalar con el cursor sobre un punto de un mapa representado en la pantalla del ordenador, un fenómeno geográfico tal como la altitud de un punto concreto de un mapa de elevaciones del terreno.
- 2) *Localización condicionada.* Uno de los problemas geográficos más habituales consiste en indicar cuál es la parte del espacio que cumple con una o varias condiciones, relacionadas con un problema concreto; por ejemplo, la localización óptima de actividades en el territorio. Si se trata de investigar en el espacio de un término municipal, donde se halla el lugar más apropiado para localizar una industria no contaminante, se debería definir en primer lugar los criterios de localización más adecuados para el establecimiento de la industria (terreno llano, proximidad a los núcleos de población, etc.)
- 3) *Tendencias.* Otro tipo de problemas es el relacionado con la comparación entre situaciones temporales distintas, referidas al mismo territorio. Se trata de ofrecer respuestas que permitan conocer la evolución de fenómenos de carácter temporal. Esta variación de la realidad se suele realizar, contrastando dos o más imágenes en diferentes momentos del tiempo.



- 4) *Rutas*. Los SIG pueden dar respuesta a cuestiones tales como: conocidas las características del territorio (ecología, litología, orografía, topografía, etc.), ¿cuál es la ruta óptima para la construcción de una carretera?
- 5) *Pautas*. Determinadas regularidades espaciales son posibles de reconocer en el tratamiento de la información geográfica con un SIG, así por ejemplo se podría establecer el patrón que define el crecimiento de un núcleo de población, intentando precisar, de acuerdo a coronas (a más o menos distancia del centro) y sectores (barriadas, etc.) las pautas de distribución en el núcleo de población.
- 6) *Modelos*. Uno de los procedimientos de gestionar la información que resulta de mayor interés en el campo de los SIG, es el de modelar la realidad de acuerdo a un prototipo que, reproduzca las bases del funcionamiento reales, y permita adelantar o deducir conclusiones sobre el pasado o el futuro.

Los conceptos anteriores se han ido desarrollando con mayor profundidad e incluso incrementándose con el transcurso del tiempo.

3.1.2. Origen de los SIG.

Se podría decir que sus orígenes se remontan al año 1854, cuando el Dr. John Snow cartografió en un mapa del distrito del Soho en Londres (Figura 3.1) la incidencia de los casos de cólera, gracias a este “primer” SIG, Snow consiguió localizar la fuente causante del brote de cólera (Snow, J, 1885). No obstante, no fue hasta el desarrollo de la informática cuando comenzaron a producirse los primeros avances, de hecho, cada progreso técnico que se ha realizado en la industria informática han supuesto nuevos logros en el desarrollo de este tipo de sistemas.



Fig.3.1.- Mapa de incidencia de la cólera en el distrito de Soho (Snow, J., 1855)

T.M. Foresman (1998), estableció una cronología compuesta por cinco etapas en las que se relacionaban los acontecimientos de interés con los sucesivos avances de los SIG (Figura 3.2.)

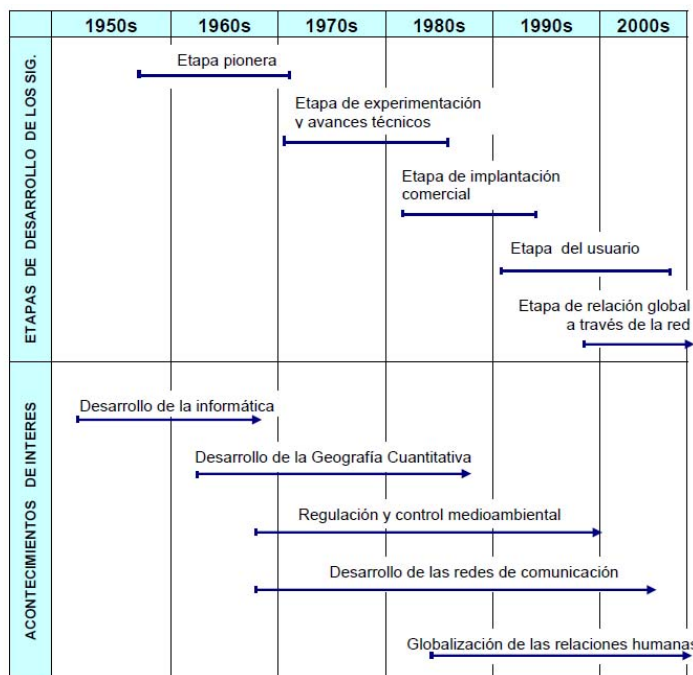


Fig.3.2.- Cronología de la evolución de los SIG, en relación con los factores que propiciaron el cambio (Foresman, T.M., 1998)



La primera etapa abarca el periodo comprendido entre finales de los años cincuenta y principios de los setenta, constituye lo que se denomina la *etapa pionera* y coincide con el desarrollo de la informática y, concretamente en el año 1966, Roger Tomlinson creó el Sistema de Información Geográfica de Canadá (CGIS) con el objetivo de planificar los recursos agrarios de las áreas rurales del país, siendo considerado el primer SIG de la historia. Incluso desde un punto de vista conceptual el CGIS aportó nuevas ideas que están vigentes en los SIG actuales.

La segunda etapa denominada *investigación y avances técnicos* comprende las décadas de los años setenta y ochenta. Tras los resultados obtenidos en la etapa pionera, comenzaron a fomentarse a través de apoyos gubernamentales el desarrollo del software de este tipo de sistemas. A modo de ejemplo, el Departamento de Defensa de Estados Unidos se convirtió en uno de los principales valedores con el objetivo de desarrollar estrategias de defensa aérea.

A mediados de los ochenta comenzaría la tercera etapa denominada *implantación comercial*, como consecuencia de los continuos progresos de la industria del hardware (equipos informáticos, dispositivos para salidas gráficas, digitalización, etc.), surgieron numerosas compañías destinadas a la fabricación y venta de los SIG comerciales.

La cuarta etapa se denominó *fase de usuario*, su nombre es debido al importante aumento del número de personas e instituciones que se interesaron en cualquier aplicación que iba surgiendo en el sector. Este hecho generó un extraordinario aumento del número de compañías dedicadas a la venta de este tipo de productos que a su vez, se vieron en la obligación de ofrecer una dedicación especial al usuario con el objetivo de preservar y aumentar la cuota de mercado. Fue en esta etapa cuando comenzó a vislumbrarse la importante transcendencia de estos sistemas informáticos en las instituciones públicas y otras administraciones de ámbito regional o nacional.

La última etapa, *relación global a través de la red*, comenzó a finales del siglo XX y es la que ocupa el momento presente, se denominó así a causa de la expansión de las tecnologías de la información en la era de la globalización, las cuales posibilitan por un lado la creación en cualquier lugar del planeta de datos espaciales de cualquier tipo y

por otro, el traslado e intercambio inmediato de dicha información a través de las plataformas actuales (internet, etc.).

3.1.3. Componentes básicos de los SIG.

Los elementos principales que integran los Sistemas de Información Geográfica son los siguientes (figura 3.3).

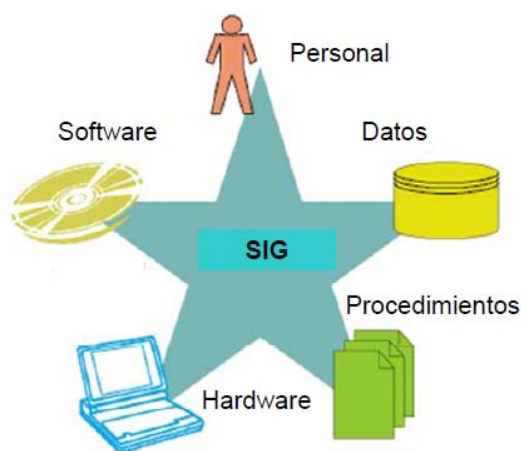


Fig.3.3.- Componentes de un SIG (ESRI, 2003)

En primer lugar habría que destacar el *software* es decir, el conjunto de programas, instrucciones y reglas informáticas, necesario para ejecutar en el *hardware* (equipo informático).

Los *datos* constituyen el tercer elemento en importancia dentro de los SIG, éstos se denominan comúnmente información georreferenciada y será aquella que habrá que introducir en el software para llevar a cabo cualquier tipo de análisis.

El *personal* técnico constituye un elemento fundamental para el correcto desarrollo de cualquier proyecto de investigación, y de igual modo ocurre con la utilización de este tipo de herramientas. El equipo debe ser multidisciplinar y acorde con las exigencias que requieran el problema a resolver. Cabría diferenciar entre dos grupos de personas: los consultores que encauzan el sistema hacia su objetivo final y los especialistas en la parte informática. Cuando se produce una comunicación bidireccional entre ambos, los



especialistas SIG comprenden el objetivo real del proyecto y los consultores se hacen partícipes de los problemas técnicos que puede suponer una idea en marcha, el resultado final mejora notablemente (Hoyuela Jayo, A. 2003).

Finalmente el último elemento (aunque no por ello menos importante) que forma parte de un SIG es la *metodología y los procedimientos de trabajo*. La clave del éxito de un SIG implica diseñar un método de trabajo que permita delimitar cada una de sus partes y establecer una relación fluida entre los diversos elementos integrantes del mismo.

3.1.4. La información geográfica.

Se denomina información geográfica a los datos con los que se trabaja en el campo de la Geografía (Santos Preciado, J.M., 2004). Presentan dos variables fundamentales: espacial y temática.

La variable *espacial* estará constituida por los componentes espaciales que sirven para realizar la recopilación de información, éstos estarán definidos tanto por su forma y extensión como por la situación que ocupan en el espacio y, dicha situación será obtenida por la localización relativa respecto a algún procedimiento de referencia exterior (normalmente, las proyecciones sobre el elipsoide terrestre y sus coordenadas de longitud y latitud). Por tanto, este tipo de variables proporcionan la representación de los objetos gráficos asociados con ubicaciones específicas en el mundo real. Dicha representación se lleva a cabo a través de puntos, líneas o polígonos. A modo de ejemplo se indican posibles objetos gráficos a representar:

- Punto: Cúspide de una montaña.
- Línea: una red de ferrocarril
- Polígono: Área que ocupa un Municipio.

La variable *temática* estará referida a los atributos adquiridos por las unidades espaciales, dicha variable puede estar relacionada con el medio físico (litología, relieve, clima, vegetación, suelo, etc.) o humano (características sociales, económicas, políticas, etc.). También es conocida como variable alfanumérica y la información que

proporciona es almacenada generalmente en forma de tabla en la que, cada fila denominada registro representa un objeto gráfico determinado y cada columna denominada campo, contiene las características o atributos de dicho objeto.

3.1.4.1. La representación cartográfica de la información geográfica.

3.1.4.1.1. La cartografía: fuente básica de la información geográfica

Tradicionalmente, la cartografía ha constituido la manera más eficaz de representar los fenómenos geográficos en el espacio, en la actualidad su importancia se ha visto aumentada ante la posibilidad de almacenar su contenido de forma digital. Cualquier punto de la superficie terrestre es obtenido a través de las coordenadas geográficas de la longitud y latitud, la primera mide el ángulo formado por el meridiano que pasa por dicho punto respecto a un meridiano establecido como origen (meridiano de Greenwich), mientras que la latitud corresponde al ángulo que forma dicho punto medido sobre el meridiano del lugar respecto al Ecuador. (Figura 3.4.).

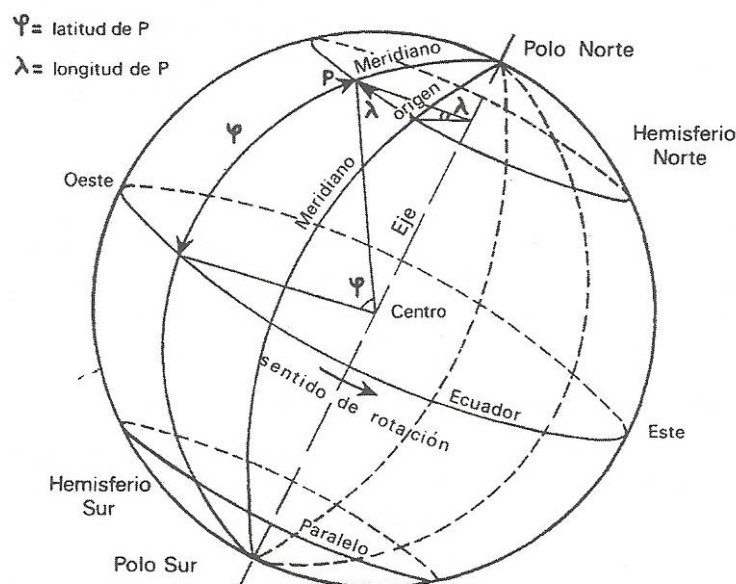


Fig.3.4.- Coordenadas terrestres (Joly, F., 1982)

La forma del planeta Tierra no es una esfera exacta, al estar achatada por los polos, su forma se asemeja a un elipsoide de revolución. En la actualidad, para efectuar estudios



cartográficos y topográficos precisos se utiliza como superficie de referencia dicho elipsoide. Aunque existen multitud de elipsoides de referencia, la reciente globalización de la información geográfica ha obligado a establecer un sistema de posicionamiento común: El sistema WGS-84 (World Geodetic System) diseñado para el sistema GPS, se ha postulado como el sistema más adecuado a nivel global en la Tierra (aunque en algunas zonas específicas del planeta no sea el más adecuado), dicho sistema utiliza las coordenadas geodésicas longitud y latitud.

La representación de la superficie terrestre en un plano se puede realizar a través de diversos sistemas de proyección. Estos se pueden clasificar en cuatro grandes grupos:

a) Sistemas de proyección cónicos

Trasladar a un plano la red de meridianos y paralelos se realiza proyectando dicha red sobre un cono. Los meridianos se representan mediante rectas mientras que los paralelos corresponden a arcos de círculo. Es adecuado en latitudes medias lo que implica que resulta imposible representar la totalidad del globo.

b) Sistemas de proyección cilíndricos

La red geográfica es proyectada sobre un cilindro y posteriormente se desarrolla sobre un plano. En este tipo de proyección los paralelos se representan mediante rectas que se van distanciando entre sí conforme se vayan alejando del Ecuador. Los meridianos en cambio, son rectas paralelas con idéntica separación. Al igual que ocurría con el sistema cónico, este tipo de sistemas es útil para latitudes no muy altas. De entre las diversas proyecciones cilíndricas existentes en la actualidad destaca por encima del resto la proyección transversal de Mercator, denominada proyección U.T.M. (Universal Transverse Mercator) o conforme de Gauss. Se basa en el empleo de un cilindro tangente a un meridiano a lo largo del cual la escala es constante de forma que, únicamente el meridiano origen y el Ecuador aparecen como rectas. En este tipo de proyección cilíndrica no se representan los polos estableciéndose como límite la latitud de 80° (figura 3.5).

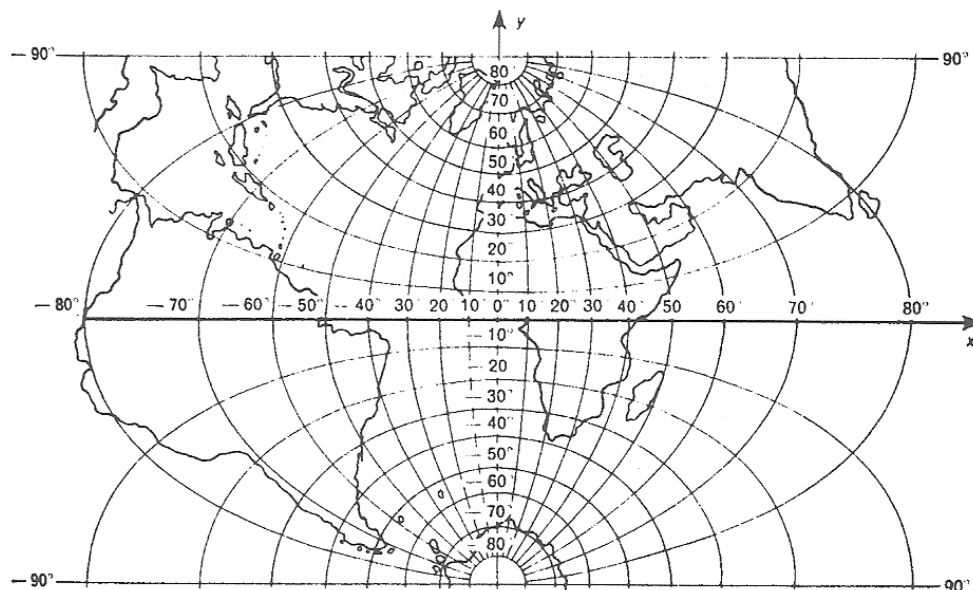


Fig.3.5.- Desarrollo completo del cilindro en el meridiano 0° (Vázquez Maure, F. y Martín López, J., 1995)

El sistema de proyección mediante coordenadas UTM es el que suele emplear en los SIG.

c) Cenitales o acimutales

La superficie del planeta se proyecta sobre un plano desde cualquier punto considerado de referencia. Se distinguen tres tipos de proyecciones de este tipo dependiendo de la situación del punto de referencia: proyección ortográfica, gnomónica y estereográfica. Las dos primeras utilizan el mismo punto de referencia (centro del planeta) y difieren en la dirección de las líneas de proyección. La tercera en cambio el origen de la proyección se sitúa sobre la superficie terrestre.

d) Otros sistemas de proyección

Son especialmente utilizados para representar la superficie de la Tierra en dos hemisferios (mapamundi). Lo más conocidos son: proyección homolográfica y sinusoidal homolosa.



3.1.4.1.2. Los mapas

La cartografía digital proporciona mapas precisos que son capaces de solventar la complejidad generada con estructuras espaciales. Por tanto un mapa debe entenderse, ya sea en formato papel o en soporte digital, como un instrumento integrador capaz de dar coherencia a la información geográfica, independientemente de su naturaleza, partiendo de dicha premisa, entre las diversas definiciones de un mapa es de destacar la siguiente: Un mapa es una representación geométrica plana, simplificada y convencional, de toda o una parte de la superficie terrestre, con una relación de similitud proporcionada, a la que se llama escala (Joly, F., 1982).

Los mapas suelen clasificarse en dos tipos: temáticos y topográficos. Los primeros realizan la representación espacial en base a un tema determinado (usos del suelo, geología, cauces, etc.). Los mapas topográficos contienen información geográfica relativa a más de un tema (relieve, rasgos sociales, etc.) A continuación se procederá a profundizar en cada uno de ellos.

Los mapas temáticos

Los mapas temáticos se pueden clasificar en función de si las variables temáticas que representan tienen carácter cuantitativo ó cualitativo. Los mapas temáticos cuantitativos representan atributos temáticos medidos en base a una razón dada ya sean con valores absolutos o relativos. Entre ellos destacan los siguientes:

- Mapas de datos, relativos a elementos zonales, con figuras geométricas (círculo, cuadrado, rectángulo, etc.) proporcionales al valor del atributo a representar.
- Mapas de datos, relativos a elementos zonales, con puntos (o círculos de tamaño constante) de forma que, cada uno de ellos representa una determinada magnitud del fenómeno a representar.
- Mapas que representan fenómenos lineales: este tipo de representación es similar a la representación con figuras geométricas con la diferencia de que en este caso



son líneas proporcionales, es decir de diversos espesores, las que indican el valor de la variable temática.

- Mapas que representan fenómenos con diferente valor en cada punto de la superficie, este tipo de mapas son interesantes de aplicar cuando se requiere representar variables muy próximas entre sí, para ello se requiere conocer los valores puntuales de las variables en cuestión y de este modo poder enlazar los puntos de igual valor e interpolar los valores intermedios. Un ejemplo común de este tipo de mapas corresponde a representar las curvas de nivel (diferencias de altitud) de un territorio dado.
- Mapas que permiten representar fenómenos expresados mediante valores relativos. Los elementos geográficos representados mediante este tipo de mapas son de carácter zonal y se muestran mediante líneas de trama. Los valores cuantitativos se transforman en categorías si las variables a representar se expresan en clases o intervalos.

Los mapas topográficos

El desarrollo de este tipo de mapas presenta como base el estudio in situ del terreno, es decir, se elaboran directamente sobre el terreno, aglutinando la mayor cantidad de información que pueda ser extraída del medio, inventariando y clasificando posteriormente para poder generar mapas temáticos específicos de alguna de las variables que haya sido previamente medida.

En España, a través del Real Decreto de 12 de septiembre de 1870 se creó el Instituto Geográfico Nacional el cual elaboró el denominado Mapa Topográfico Nacional, se han ido realizando diversas actualizaciones al mismo de forma que hoy en día, dicho mapa se representa a escala 1:25000 y utiliza las coordenadas UTM.

Entre la diversa información contenida en este tipo de mapas habría que destacar la siguiente: vegetación, agua (cauces, redes de drenaje), formas de relieve (montañas, mesetas, etc.), infraestructuras artificiales (red viaria, núcleos de población,



monumentos, etc.) y líneas de división administrativa (límites provinciales, municipales, etc.).

3.1.4.2. La estructura de la información geográfica.

La base de datos espacial de un SIG permite representar de forma digital el mundo real en función de objetos discretos, la información de estos objetos (de carácter temático o espacial), expresada de forma numérica, proporcionan una colección de datos referenciados que actúa como modelo de la realidad. La forma en la que se obtiene la información geográfica en este formato, se denomina modelo de datos. Los Sistemas de Información Geográfica utilizan dos tipos de modelos básicos de datos: el modelo raster y el modelo vectorial.

3.1.4.2.1. El modelo raster.

En el modelo raster, el espacio se representa mediante un conjunto de celdas o píxeles que no mantienen una relación directa entre ellas ya que, sus límites están definidos explícitamente. Cada celda tiene un valor asignado que corresponde con el tipo de información temática que proporciona de forma que, el espacio es poblado por un largo número de celdas regularmente distribuidas, cada una de las cuales puede tener diferentes valores (Aronoff, S., 1989).

El uso del formato raster está orientado para modelar fenómenos y variables continuas (temperatura, elevación de una zona, etc.) o datos discretos espaciales (uso de suelo, tipo de vegetación, etc.). Para representar la información, se toma como referencia la esquina inferior izquierda, el ancho y la altura de cada celda, de modo que la localización de cada celda queda definida a partir de la columna y fila en la que se sitúa.

El modelo raster es comúnmente utilizado para representar imágenes del planeta adquiridas mediante fotografías aéreas o imágenes procedentes de los satélites. En éstas últimas pueden coincidir múltiples bandas o capas que proporcionen más de un valor para cada celda, estos valores son comparados con conocidos modelos espectrales con la finalidad de seleccionar y clasificar la información temática (temperatura, vegetación, suelo, etc.)



En la figura 3.6. se muestra la representación de la realidad en el modelo raster:

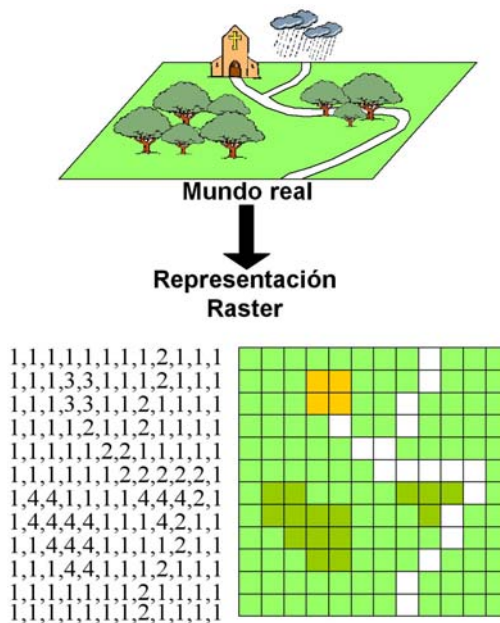


Fig.3.6.- Ejemplo de representación raster (Palomar, J., 2010)

La información temática se estructura en el modelo raster de forma individual para cada uno de los atributos, por tanto la información de cada una de las variables temáticas que se pretenda representar se almacena en una capa independiente. Este tipo de proceder implica una serie de inconvenientes ya que cada base de datos perteneciente a una variable temática contiene un elevado conjunto de números ordenados según la configuración regular del territorio, cuantas más variables temáticas intervengan en la estructura del SIG mayor cantidad de información se debe de procesar. No obstante este inconveniente queda resuelto por la propia configuración de los elementos espaciales ya que, éstos al ser regulares (celdas) y del mismo tamaño son también coincidentes por lo que resulta factible, empleando modelos lógicos o matemáticos, el planteamiento y la resolución de problemas territoriales. Así, un elemento puntual estaría definido por una celda individual, un elemento lineal por una secuencia de celdas alineadas y un polígono por celdas contiguas con el mismo valor temático. Este hecho supone necesario estimar un cierto error que dependerá de las dimensiones de las celdas (pixeles) de forma que, a menor tamaño de celda (mayor resolución) menor será el error cometido.

3.1.4.2.2. El modelo vectorial.

El modelo vectorial concibe el espacio de modo continuo, cumpliendo los postulados de la geometría euclídea (Cebrián, 1988), como consecuencia de ello, los objetos espaciales se representan de una manera clara y determinada consiguiendo que la representación del mundo real sea más realista, (figura 3.7.). La información geográfica en este modelo es representada mediante puntos, líneas y polígonos. Los puntos se representan mediante un par de coordenadas (x_1, y_1) . Las líneas estarán formadas por una sucesión abierta de puntos $(x_1, y_1), (x_2, y_2) \dots (x_n, y_n)$ y finalmente los polígonos, se construyen de igual forma que las líneas pero con la diferencia de que las coordenadas del primer punto y el último deben coincidir para indicar una superficie plana.

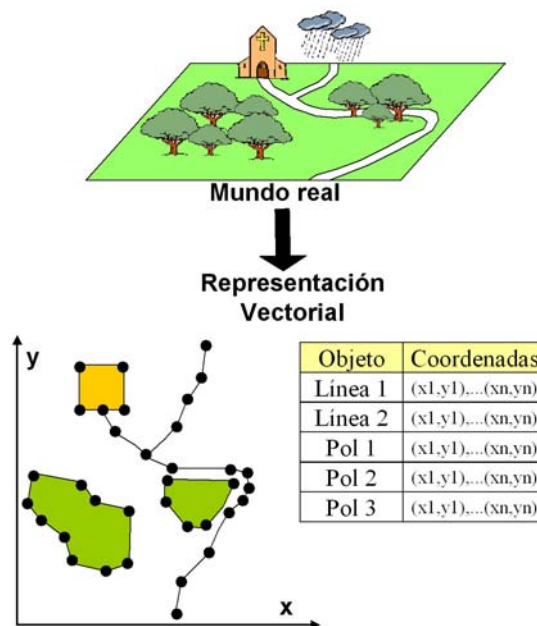


Fig.3.7.- Ejemplo de representación vectorial (Palomar, J., 2010)

En el modelo vectorial, conviene diferenciar entre estructuras de datos cartográficas y topológicas. Las primeras proporcionan únicamente, la forma y posición de los objetos espaciales, por lo que sólo requieren de las coordenadas para definir los objetos (puntos, líneas y polígonos). La estructura topológica en cambio, requiere para su definición las relaciones entre sus elementos (unión, intersección, vecindad, pertenencia).



3.1.4.2.3. ¿Qué modelo utilizar?

Tal y como se ha detallado con anterioridad, los dos modelos de representación presentan características que los definen y diferencian notablemente. No obstante, no resulta posible aseverar que un modelo sea mejor que otro, además ciertas aplicaciones ofrecen mejor respuesta en alguno de ellos de forma explícita; por ejemplo, la representación de una variable espacial continua como la altitud, encuentra una representación más operativa y manejable en el modelo raster. En contraposición, la representación de una variable discreta como la clase de suelo puede obtenerse de forma más simple en el modelo vectorial.

Por tanto, en lugar de intentar elegir un modelo de datos específico, conviene encaminar los esfuerzos hacia la utilización de sistemas que permitan integrar ambos de forma que, se pueda obtener el máximo rendimiento de cada uno de ellos.

3.1.4.2.4. El concepto de capa.

Los datos espaciales a introducir en un SIG pueden considerarse como un conjunto de mapas que representan una porción concreta de la superficie, cada mapa representa una variable temática, por ejemplo carreteras, cauces, ocupación del suelo, etc. Las variables temáticas contenidas en un SIG reciben el nombre de capas temáticas, en ellas se representa una tipología específica de elementos del mundo real (figura 3.8.). Según Santos Preciado, J.M. (2004) se denomina capa temática al conjunto de datos espaciales asociados a un contenido temático común. Por tanto una capa temática corresponde a una separación lógica de los datos espaciales existentes en un mapa en función a un tema concreto de manera que, cada capa almacena un tipo particular y homogéneo de datos espaciales.

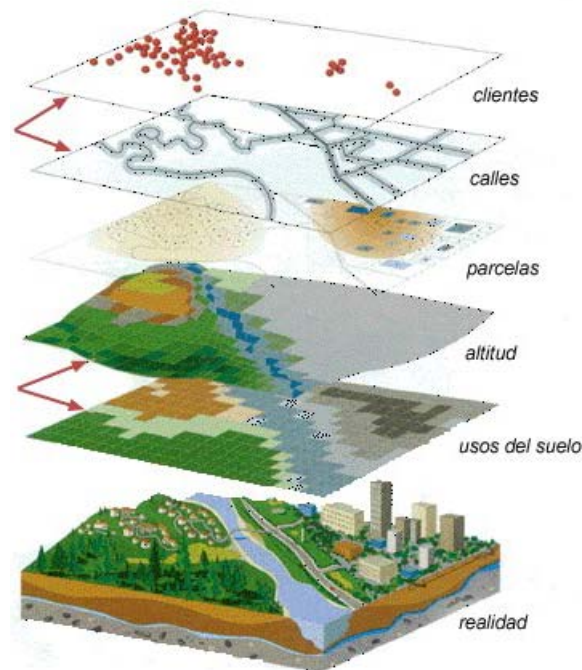


Fig.3.8.- Capas temáticas en un SIG (Palomar, J., 2010)

En la estructura de los SIG es de destacar el hecho de que el conjunto de capas que lo componen presentan una característica fundamental desde el punto de vista de los análisis realizados a posteriori; cualquier punto representado en una determinada capa presenta idéntica localización (x,y) en el resto de capas temáticas, consiguiendo por tanto establecer una superposición exacta entre dos o más capas de un mismo SIG. Esta característica que a simple vista parece que no proporciona gran interés es al contrario de un importancia fundamental ya que, de esta forma resulta posible realizar operaciones espaciales entre capas y aumentar las posibilidades de utilización del SIG.



3.1.4.3. La organización de la información geográfica. Las bases de datos

3.1.4.3.1. Las bases de datos: concepto, evolución y tipos

Según J. Martín, (1980), una base de datos se define como una colección de datos interrelacionados, almacenados en conjunto, cuya finalidad es la de servir a una aplicación o más. Éstos se almacenan de forma que resulten independientes de los programas que los utilizan, existiendo determinados métodos que permiten introducir nuevos datos o modificar los existentes.

En sus inicios, los datos eran almacenados de forma aislada y diseñados con el objetivo de disponer de ellos en el momento que fueran requeridos en alguna aplicación concreta, esta forma de almacenamiento presentaba el inconveniente de que un cambio en la aplicación para la que inicialmente habían sido creados podría provocar una falta de disposición de esa información. Con la metodología de funcionamiento inicial surgían otros inconvenientes tales como la redundancia e inconsistencia de la información, problemas de seguridad e integridad de la información, etc.

Con el transcurso del tiempo se ha ido desarrollando y perfeccionando la metodología de las bases de datos consiguiendo transformar el primitivo sistema de archivos aislados por otro en el que los datos constituyen el centro de la organización de forma que, son los programas informáticos o aplicaciones los que se diseñan y adaptan al formato y organización de la información disponible.

Los modelos de bases de datos cuyo desarrollo fue más significativo quedaron reducidos en cuatro tipos: modelo jerárquico, modelo en red, modelo relacional y el modelo dirigido a objetos.

El *modelo de base de datos jerárquico* está actualmente en desuso, establece interrelaciones entre los datos mediante jerarquías de forma que cada entidad está relacionada con otra entidad situada en un nivel inferior y con otra en un nivel superior. A través de este modelo se crea un árbol de jerarquías cuyo extremo (nivel superior) se le denomina raíz, a los siguientes niveles, padres e hijos y finalmente, a los elementos

situados en las puntas de las ramas de cada nivel que no tienen hijos se le denomina hojas. (figura 3.9).

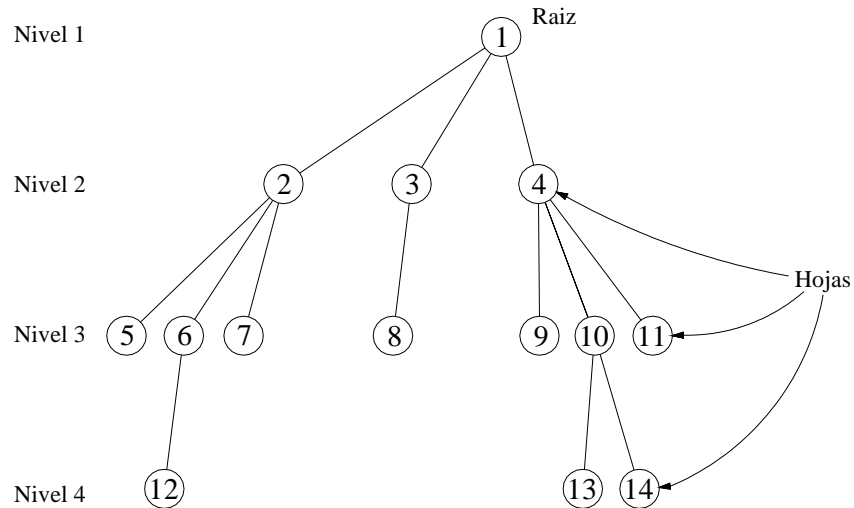


Fig.3.9.- Estructura de base de datos jerárquica

Al igual que sucede con el modelo jerárquico, el **modelo de base de datos en red** está en desuso en la actualidad, ofrece la ventaja respecto al anterior de que proporciona mayor flexibilidad ya que permite que cada entidad pueda relacionarse con cualquier otra de forma que, si se adopta la descripción de niveles indicada en el modelo jerárquico, en este caso cada hijo puede tener más de un padre (figura 3.10).

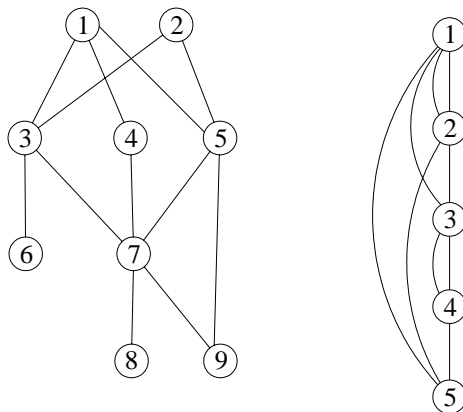


Fig.3.10.- Estructura de base de datos en red



El *modelo de base de datos orientado a objetos* interpreta las estructuras de datos como entidades variables denominadas objetos que, además de asociarse a un conjunto de variables, responden a un conjunto de mensajes a través de una serie de métodos que devuelven un valor como respuesta a cada mensaje.

A consecuencia de la variabilidad de los objetos, éstos deben definirse a través de clases diferentes de forma que, se denominan objetos similares aquellos que responden a los mismos mensajes, utilizan los mismos modelos y tienen variables del mismo nombre. Incluso pueden llegar a formar clases de niveles superior (superclases) que hereden las características de sus predecesores. Por ejemplo, en el análisis de un entorno rural o rústico, las parcelas constituirían los objetos similares de una clase dada los cuales podrían tener asociadas la superficie, el valor catastral, polígono, parcela, subparcela, etc. Si dichas parcelas se asocian en una superclase podrían originarse los municipios, los cuales heredarían los valores anteriores.

Aunque este modelo se aproxima con mayor precisión a la realidad, el hecho de tener que definir cada objeto, con sus asociaciones, propiedades y características, implica una complejidad de tal grado que es preferible el empleo de otro modelo más sencillo de utilizar denominado modelo de datos relacionales.

En el *modelo de base de datos relacional* los datos se ordenan en tablas (comúnmente denominadas tablas de atributos) de forma que las filas (o registros) corresponden a los objetos geográficos y las columnas (o campos) a los atributos o variables temáticas. Cada tabla posee un atributo único denominado Clave que constituye el elemento identificador de la misma de forma que, es posible relacionar distintas tablas a partir de ese elemento de enlace. La clave puede resultar de una combinación de columnas en lugar de una única columna, en dicho caso, se dice que existen diferentes claves candidatas y, se debe entonces, establecer un orden entre la clave denominada primaria y las secundarias.

En este modelo, todos los campos se hallan en el mismo nivel (no hay relaciones jerárquicas), facilitando de este modo las operaciones entre ellos y permitiendo crear nuevas tablas.



Este modelo requiere el cumplimiento de una serie de condiciones que a continuación se describen:

- Las columnas o campos deben definirse con identificativos diferentes ya que, dos campos con el mismo nombre puede dar lugar a confusión al realizar operaciones con alguno de ellos.
- Cada campo debe de pertenecer al mismo dominio, éste puede ser una cadena de caracteres si el atributo es un identificador (ejemplo: núcleo de población) o una cadena de valores numéricos si el atributo es un número (ejemplo: superficie).
- Las operaciones (uniones, intersecciones, etc.) entre atributos de diversos campos implican que éstos deban pertenecer al mismo dominio.
- Cada celda debe contener un único valor representativo
- Cada registro o fila debe ser distinta a las demás. Por ello se suele utilizar una o más columnas como elementos identificadores denominadas claves que garanticen la diferencia de valores entre filas.
- En el caso de que se carezca de información en una celda, ésta ausencia no debe confundirse con el valor cero.

El modelo relacional es el más utilizado en la actualidad ya que contiene tres elementos fundamentales que permiten un funcionamiento efectivo de esta forma de almacenar información (Reeve, D., 2000):

- Un elemento estructural, que describe la manera de guardar los datos.
- Un elemento de manipulación, que permite el manejo operativo de las bases de datos relacionales.
- Un elemento de integridad, que ofrece las reglas de construcción de las bases de datos, para que su funcionamiento se realice con la validez y consistencia suficientes.

3.1.4.3.2. La estructura de datos en el modelo raster

La estructura de datos raster es un conjunto de capas individuales (una por cada variable a representar) en el que mediante una rejilla de dimensiones rectangulares se recoge la



información geográfica. Entre sus grandes ventajas y desde el punto de vista de la estructuración de la información geográfica, destaca por encima del resto la unión intrínseca de las componentes espacial y temática. El hecho de subdividir el territorio a través de una retícula regular permite definir cada variable o atributo de forma secuencial, identificando los valores obtenidos en los píxeles, en un orden determinado. La sucesión de los valores del total de las celdas, manteniendo la misma disposición ordenada para todas las variables, permite coordinar los valores temáticos de dos atributos en idéntica celda. Entre las diversas formas de almacenar la recogida de información geográfica, las más utilizadas son las siguientes:

- *Enumeración exhaustiva*: Consiste en almacenar de forma individual cada uno de los valores de las celdas, siguiendo normalmente el orden de las filas, hasta indicar la totalidad de los valores existentes (figura. 3.11).

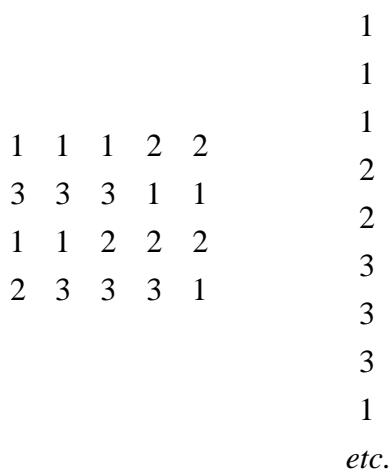


Fig 3.11.- Imagen raster de 4 filas y 5 columnas con valores temáticos 1, 2 y 3 organizada mediante enumeración exhaustiva

- *Codificación “run length”*: Consiste en la compactación de la información reflejando el número de veces que cada valor temático se repite, en idéntico orden al establecido con anterioridad (figura 3.12).



					3	1
1	1	1	2	2	2	2
3	3	3	1	1	3	3
1	1	2	2	2	4	1
2	3	3	3	1	4	2
					3	3
					1	1

Fig 3.12.- Imagen raster de 4 filas y 5 columnas con valores temáticos 1, 2 y 3 organizada mediante codificación "run lenght"

- *Estructuras jerárquicas:* Consiste en utilizar una resolución variable en función a la homogeneidad o heterogeneidad de la información de las celdas. Este procedimiento se fundamenta en la unificación de celdas contiguas cuando presentan idéntico valor en otras celdas (también con forma cuadrada) de mayores dimensiones. Aquellas celdas en las que no sea posible realizar la unificación, se consideran unidades terminales. El proceso finaliza cuando todos los cuadrados sean homogéneos (figura 3.13).

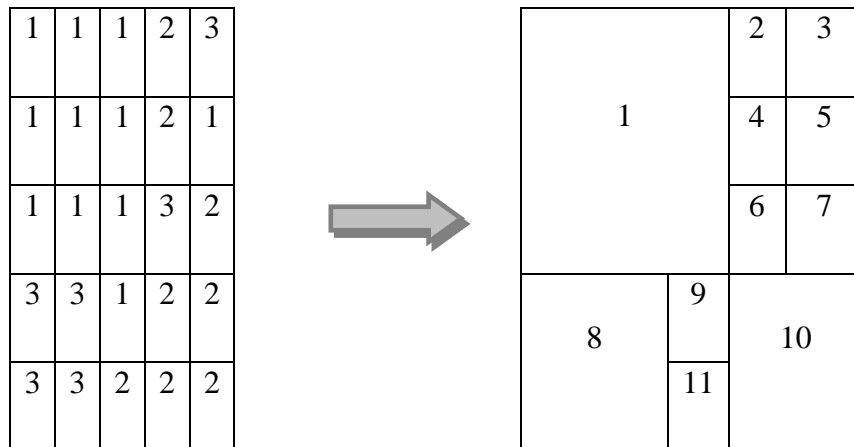


Fig 3.13.-Representación de imagen raster de 5x5 mediante estructura jerárquica

3.1.4.3.3. La estructura de datos en el modelo vectorial

La estructura de datos vectorial se construye separando la información espacial de la temática, por ello, la base de datos que se suele utilizar es la base de datos relacional



donde el campo clave sirve de enlace con la base de datos espacial. Las estructuras de datos vectoriales más extendidas son las siguientes:

- Lista de coordenadas: Consiste en definir cada objeto espacial mediante un identificador, seguido del número de vértices que integra y de la lista de coordenadas de cada uno de sus vértices (figura 3.14).

<i>Objeto espacial</i>	<i>Identificador</i>	<i>Número de puntos</i>	<i>Coordenadas</i>
Punto	A	1	(4,4)
Línea	B	4	(2,1), (4,2), (6,2), (7,3)
Polígono	C	4	(2,6), (2,7), (3,7), (5,5)

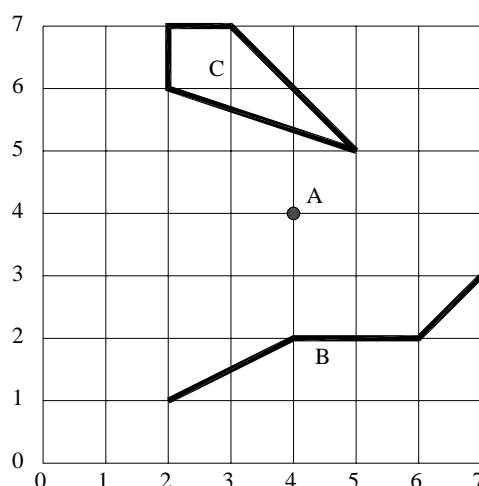


Fig.3.14.- Ejemplo de estructura de base de datos vectorial

- Diccionario de vértices: Los objetos espaciales se definen en dos etapas mediante dos tablas. En la primera tabla se registra la relación del total de los vértices con una columna identificador para cada vértice y dos columnas para representar sus coordenadas X e Y. La segunda tabla define los objetos espaciales que integran la estructura (puntos, líneas ó polígonos) a partir de los vértices incluidos en la tabla inicial.

- La estructura arco/nodo: Este tipo de organización está basada en los conceptos arco y nodo. Se denomina nodo al punto intersección de más de dos líneas, y se define un arco como la línea o segmento que comienza en un nodo y termina en otro. La estructura espacial se realiza mediante tres tablas que muestran la topología de los polígonos existentes, así como la de los nodos y los arcos.
- Estructura TIN (Triangulated Irregular Network): Consiste en representar la información geográfica mediante triángulos que unen puntos del espacio distribuidos irregularmente, por ello, utiliza la configuración de una estructura arco/nodo. Este tipo de estructura surgió sobre la base de poder representar no sólo las coordenadas X e Y sino también la coordenada en altura Z (figura 3.15).

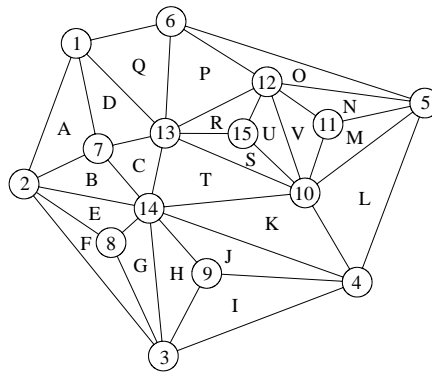


Fig.3.15.- Ejemplo de estructura vectorial de datos TIN

3.1.4.4. La obtención de la información geográfica

En sus comienzos, las fuentes de información geográfica en España eran los organismos nacionales como el Instituto Geográfico Nacional (IGN) y el Servicio Geográfico del Ejército (SGE), organismos autonómicos como el Instituto Cartográfico de Cataluña (ICC) y organismos locales (municipios). Este tipo de información constituía la denominada cartografía básica, la cual hacía referencia a mapas topográficos, altitudes, vías de comunicación, núcleos de población, hidrografía, etc. Al mismo tiempo, también se fue desarrollando otro tipo de cartografía que reflejaba variables temáticas tales como usos del suelo, redes eléctricas y subestaciones, mapas de cultivos, mapas geológicos, etc. Al contrario que ocurría con la cartografía básica, la cartografía temática era más dispersa y su origen más variado (Red Eléctrica Española, Centro de Gestión Catastral y



Cooperación Tributaria, etc.). La mayoría de la cartografía indicada no estaba disponible en formato digital y en el caso de que existiese, la calidad y la precisión no solían ser las adecuadas dificultando por tanto la posibilidad de obtener una base de datos óptima. A consecuencia de tales problemas, el IGN se encargó de poner en marcha un sistema que permitiera ofrecer una cobertura a los procesos de captura y tratamiento de datos con el objetivo de que sirviera de base para cualquier sistema de planificación territorial, éste se denominó Sistema de Información Geográfica del Instituto Geográfico Nacional (SIGNA) y dio origen a las llamadas Bases de Datos Monográficas entre las que destacan:

- Base de datos de entidades de población (1983)
- Base de datos de líneas límite de términos municipales (1984)
- Base de datos de estaciones geomagnéticas (1986)
- Base de datos de señales gravimétricas (1983)
- Base cartográfica numérica 1:250.000 (1986)
- Base cartográfica numérica 1:200.000 (1987)

Inicialmente, las incoherencias entre algunas bases de datos implicaba la necesidad de adaptar la información geográfica al sistema en el que se fuera a utilizar provocando que, tanto la situación de la información georreferenciada como su disponibilidad para los usuarios no fuera la más conveniente. No obstante, gracias a la interconexión de datos y sistemas informáticos forzada por la red, esta situación se ha ido transformando hasta tal punto que, hoy en día los sistemas de información geográfica constituyen una importante tecnología para el manejo y gestión de la información geográfica a escala local, regional, nacional e incluso global. Por este motivo, no es de extrañar que en la actualidad hayan surgido diversos organismos internacionales interesados en la elaboración de una infraestructura de datos a escala mundial.

La homogeneización de la información geográfica a escala global todavía se encuentra en una fase bastante preliminar ya que, la fragmentación de las bases de datos espaciales y las dificultades de acoplamiento están impidiendo una correcta integración. Por ello, se han creado organismos con el objetivo de velar por la calidad e intercambiabilidad de



la información georreferenciada, con esta finalidad a nivel europeo ha surgido INSPIRE (The INfraestructure for SPatial InfoRmation in Erurope) la cual pretende crear una infraestructura de datos espaciales (desde la escala local a la global) a la que puedan acceder tanto organismos públicos como privados interesados en la planificación y gestión del territorio y de los recursos naturales.

A escala nacional, ha surgido el proyecto IDEE (Infraestructura de Datos Espaciales de España) y, con el objetivo de avanzar en su desarrollo el Consejo Superior Geográfico estableció en el año 2002 un grupo de trabajo organizado en cuatro subgrupos: Datos de Referencia, Metadatos, Arquitectura (junto con sus normas) y finalmente Política de datos, precios y licencias. La finalidad de estos grupos de trabajo es servir como nexos de unión con los expertos relevantes en la materia para consensuar una serie de recomendaciones que aseguren la transparencia, interoperabilidad, y compatibilidad de datos, metadatos, catálogos, servicios y recursos.

3.1.4.5. Los errores relacionados con la información geográfica

Las propias características de la información geográfica implican que se puedan incorporar a las bases de datos errores de diversa índole, con la consiguiente incertidumbre que puedan causar en los resultados obtenidos. Partiendo de la base que los errores son consustanciales a los datos (Gutiérrez Puebla, J. y Gould, P., 1994), se trataría, más que evitarlos como tal, de asumirlos e intentar controlarlos, de manera que se limiten sus efectos.

En el caso de los SIG, el origen de los errores está estrechamente relacionado con las principales fases de manejo de la información geográfica en este tipo de sistemas: recogida e introducción de la información, almacenamiento, procesamiento, gestión y, finalmente, representación. Aronoff (1989) describe una serie de errores en función de la fase de manejo de la información geográfica:

1. Errores derivados de la recogida e introducción de la información. Partiendo de la base de que las principales fuentes de la información geográfica (mapas, imágenes de teledetección, fotografías aéreas, etc.) contiene errores que se



- incorporan a la bases de datos, otro tipo de errores se derivan de los procesos de digitalización de la información y su conversión de formato analógico a digital.
2. Errores de procesamiento y almacenamiento de los datos. La codificación de la información implica la transcripción de la misma y su sustitución por dígitos o números (previo establecimiento de un sistema de clasificación adecuado). La codificación es, por tanto, un procedimiento que define la información, con vistas a su registro y almacenamiento informático. Tarea normalmente manual y reiterada en la que es frecuente cometer errores, que se añaden a los anteriores y que es preciso considerar.
 3. Errores derivados de la manipulación y gestión de los datos. Este tipo de errores se suelen producir al aplicar algún procedimiento o ejecutar algún comando inherente en el SIG. A modo de ejemplo, se indica un error habitual en la superposición de capas temáticas: en el caso de que no coincida de forma exacta una capa con otra, se pueden originar polígonos ficticios generando errores en la información.
 4. Errores debidos a la representación cartográfica de la información. Aunque los actuales dispositivos de representación e impresión de la información cartográfica proporcionan una elevada precisión, ésta en ocasiones no alcanza a proporcionar la precisión requerida.

3.1.5. Los SIG en Energías Renovables.

Los SIG, por el hecho de ser herramientas informatizadas que manejan información georreferenciada están extendiendo su uso en multitud de campos del saber, la investigación o, simplemente, de la aplicación práctica (Santos Preciado, J.M., 2004). Entre las diversas aplicaciones de los SIG destacan los estudios para realizar análisis de cambios de uso de suelo, gestión de los recursos naturales, análisis del paisaje, de acogida del medio respecto al desarrollo de una actividad determinada y su posible impacto ambiental, etc.

A mediados de la década de los 90 se comenzaron a realizar estudios basados en SIG en el campo de las energías renovables, en dicha década es de destacar los estudios llevados a cabo por Voivontas et al (1998) en los que se evaluó el potencial eólico de la



isla de Creta. En el año 1999, Sorensen & Meibom emplearon herramientas tipo SIG para estudiar la evolución de la demanda energética mundial y las distintas opciones de satisfacer dicha demandas mediante el empleo de fuentes de energía renovable.

A comienzos del siglo XXI, Cheng-Dar & Shi-Sian (2006) evaluaron fuentes de energía renovable tales como energía solar, eólica y biomasa en áreas rurales del suroeste de Taiwán mediante el empleo de un SIG. Posteriormente Byrne et al (2007) realizaron un estudio de fuentes de energía renovable de pequeña escala (potencia generada inferior a 2 kW) con el objetivo de llevar a cabo electrificaciones rurales en el oeste de China, los autores utilizaron como herramienta de análisis un SIG con el objetivo de evaluar el potencial de la demanda de energía renovable en entornos rurales. Ese mismo año Domínguez Bravo et al, llevaron a cabo un estudio que evaluaba los límites máximos de potencial y generación de energía eléctrica mediante fuentes renovables en España, utilizaron un SIG para tener en cuenta las restricciones impuestas por la propia naturaleza del territorio.

Más recientemente, Tiba et al (2010) desarrollaron un sistema de planificación energético sobre la base de un SIG para trazar y gestionar los sistemas de energía solar, eólica y biomasa en diversas áreas rurales de Brasil. Por otro lado, Van Hoesen & Letendre (2010) describieron un modelo con el objetivo de satisfacer las demandas energéticas en áreas rurales de Vermont (EEUU) y, emplearon un SIG para desarrollar un inventario de fuentes de energía potenciales para tecnologías de biomasa, energía solar y eólica.

Tal y como se ha descrito en el presente apartado, los SIG constituyen una excelente herramienta para el análisis de planificaciones energéticas tales como evoluciones de demandas energéticas, posibles ubicaciones de plantas de EERR en sistemas descentralizados (entornos rurales), obtención de los límites de potenciales energéticos, etc.

En la presente Tesis, teniendo como base los SIG se pretende alcanzar los dos objetivos siguientes; el primero consiste en obtener la superficie disponible para albergar plantas de EERR (energía solar fotovoltaica, termoeléctrica y eólica) en el litoral de la Región



de Murcia. El segundo objetivo consiste en proporcionar una tabla de atributos que refleje la totalidad de criterios que influyen a la hora de definir los mejores emplazamientos para posteriormente, clasificar y elaborar un ranking recurriendo a Sistemas de Ayuda a la Decisión.

3.2. Software gvSIG

El software que se aplicará en este trabajo es el Sistema de Información Geográfica de la Generalitat Valenciana denominado gvSIG, su origen se remonta al año 2004 y nace con el objetivo de llevar a cabo la migración a software libre de los sistemas informáticos de la Conselleria de Infraestructuras y Transporte (CIT) de la Comunidad Valenciana. Los objetivos iniciales son rápidamente ampliados a consecuencia de su naturaleza como software libre que permite facilitar la expansión de su tecnología y establece las bases sobre la que constituir una comunidad para su posterior desarrollo.

3.2.1. ¿Por qué gvSIG?

El proyecto gvSIG nace como respuesta a las siguientes preguntas:

- ¿Cómo se interpreta el modelo del software libre?
- ¿Qué hacer para que sea un proyecto duradero, sostenible en el tiempo?
- ¿Cómo construir una comunidad sólida?

El software libre es un modelo que intenta sustituir al modelo actualmente dominante del software comercial explotado a través de patentes. Se fundamenta en el conocimiento compartido y la colaboración para progresar de forma conjunta con el objetivo de trabajar desde el punto de vista de la ciencia, ingeniería y arte en la colecta y manejo de información geográficamente referenciada (geomática) por un modelo eficiente y justo. El hecho de compartir el conocimiento se debe entender como un medio en lugar de cómo un fin ya que, de esta forma el proyecto adquiere consistencia y madurez prolongándose de manera eficiente con el transcurso del tiempo.

La comunidad gvSIG está compuesta por desarrolladores, usuarios, traductores, etc. y además por profesionales que llevan a cabo las tareas de mantenimiento y coordinación



de las diferentes áreas que lo constituyen (arquitectura, desarrollo, documentación, internacionalización, infraestructuras, espacios web, etc.).

Aunque los SIG comerciales ampliamente extendidos en la actualidad (comúnmente denominados software propietarios) ofrecen importantes ventajas (garantía en su manejo, madurez de las aplicaciones, etc.), presentan en su contra una serie de inconvenientes que con el paso del tiempo se van acentuando:

- Se requieren mayor número de usuarios con el consiguiente aumento del coste de licencias.
- Están cerrados a otras tecnologías con la imposibilidad de desarrollo en otras ramas y arquitecturas.
- etc.

Tales inconvenientes requieren un cambio brusco de rumbo ya que la dinámica del mundo SIG se encamina hacia otras direcciones (INSPIRE, proyecto IDEE, interoperabilidad, etc.). Y es precisamente este cambio de rumbo, el que está permitiendo que el proyecto gvSIG vaya adquiriendo mayor consistencia y eficacia ya que, además de su marcado carácter libre ofrece las siguientes ventajas:

- Portable: funciona con distintas plataformas hardware / software (Linux, Windows, Java, etc.).
- Modular: permite ampliarlo con nuevas funcionalidades y aplicaciones una vez finalizado su desarrollo.
- De código abierto: el código fuente original con el que fue creado está disponible para el manejo de cualquier usuario o desarrollador.
- Sin licencias: una vez finalizado su desarrollo no se requerirá abonar importe alguno por su instalación.
- Interoperable: capaz de acceder a los datos de otros programas o software propietario (ArcView, AutoCAD, Microstation, etc.) sin necesidad de tener que realizar cambios de formato.

3.2.2. Manejo de la aplicación

A consecuencia de ser un software libre, gvSIG está disponible en la red y resulta posible la descarga e instalación de sus diferentes versiones siguiendo los pasos descritos en la misma (www.gvsig.org). Una vez instalado se podrá ejecutar el programa, que permite trabajar al usuario de forma gráfica mediante vistas ó mediante tablas de atributos (de forma alfanumérica), ofreciendo la posibilidad de crear sus propios mapas con las características de las vistas y tablas de atributos (figura 3.16.).

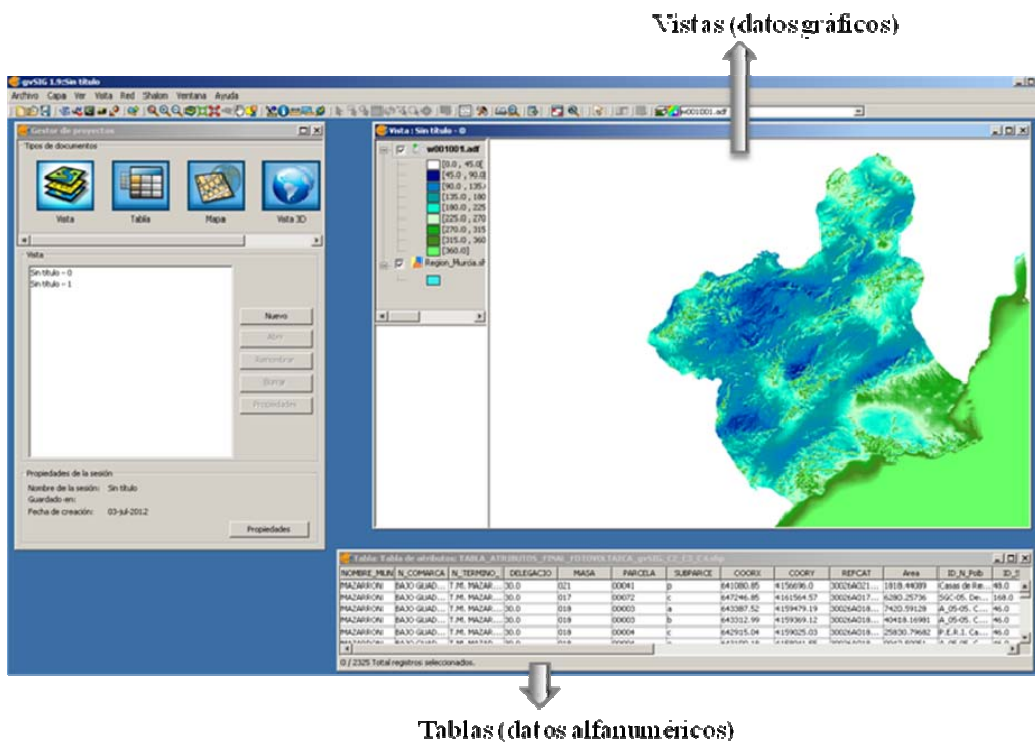


Fig.3.16.- Visualización del software gvSIG

3.2.2.1. Vistas.

El software gvSIG permite crear vistas en la que se van visualizando datos gráficos en forma de capas temáticas que el usuario desee introducir (capas vectoriales y raster en diferentes formatos, capas remotas desde servidores en la red, etc.). Las capas temáticas utilizadas pueden ser de naturaleza tan dispar como por ejemplo: una capa vectorial que represente una red de carreteras, una capa raster que muestre una foto aérea de un



territorio, otra capa raster que represente los valores de la velocidad del viento en una zona concreta, etc.

Tal y como se ha mencionado con anterioridad, las capas temáticas pueden ser introducidas en el software en diferentes formatos, los formatos más habituales que utiliza gvSIG son los indicados en la tabla 3.1.

<i>Software</i>	<i>Formato de capa temática</i>
gvSIG	Raster Driver
	SHP Driver
	DWG Memory Driver
	DXF Memory Driver
	GML Memory Driver
	KML Memory Driver
	DGN Memory Driver
	OSG Driver

Tabla 3.1.- Tipos de formato de capas temáticas en gvSIG

Con gvSIG no sólo resulta posible añadir capas en diferentes formatos, sino que además éstas pueden ser introducidas desde múltiples orígenes de datos:

- Capas almacenadas en disco duro
- Tablas almacenadas en bases de datos externas
- Capas de texto en forma de anotaciones
- Capas remotas desde servidores en Internet como:
 - Web Map Service (WMS): Permite el acceso tanto a información vectorial como a información raster, aunque únicamente devuelve una imagen raster como resultado. Desde dicho servidor resulta posible realizar consultas de atributos y visualizar vistas, pero no editar.
 - Web Feature Service (WFS): Permite el acceso a información vectorial remota, obteniendo una capa vectorial como resultado (en formato



GML). A través de este servidor es posible tanto consultar como editar atributos.

- Web Coverage Service (WCS): Permite el acceso a datos raster, pero el resultado no es una imagen estática (como WMS) sino que devuelve una copia de los datos. A través de este servidor también es posible tanto consultar como editar.
- etc.

3.2.2.1.1. Edición.

Lo indicado en el apartado anterior, permite vislumbrar el alcance que puede ofrecer el software ya que, no sólo ofrece la posibilidad de visualizar mediante representación gráfica vistas de cualquier tipo, sino que además es capaz de realizar diversas operaciones gráficas y matemáticas (tanto en una única capa como en varias), aumentando de esta manera su funcionalidad.

Las vistas no quedarían únicamente visualizadas ya que, si el usuario lo requiere, resulta posible ejecutar el comando Edición y de esta manera, disponer la capa temática para añadir o modificar información tanto geométrica (a nivel gráfico) como alfanumérica:

- Información geométrica. Añadiendo, borrando o cambiando la geometría de entidades almacenadas en archivos vectoriales (formatos .shp o .dxf)
- Información alfanumérica. Añadiendo o borrando registros, modificando la estructura de las tablas o manipulando los valores de campos mediante operaciones lógicas y algebraicas.

La alteración de la información geométrica original se puede llevar a cabo mediante diversas herramientas de edición gráfica (figura 3.17.).

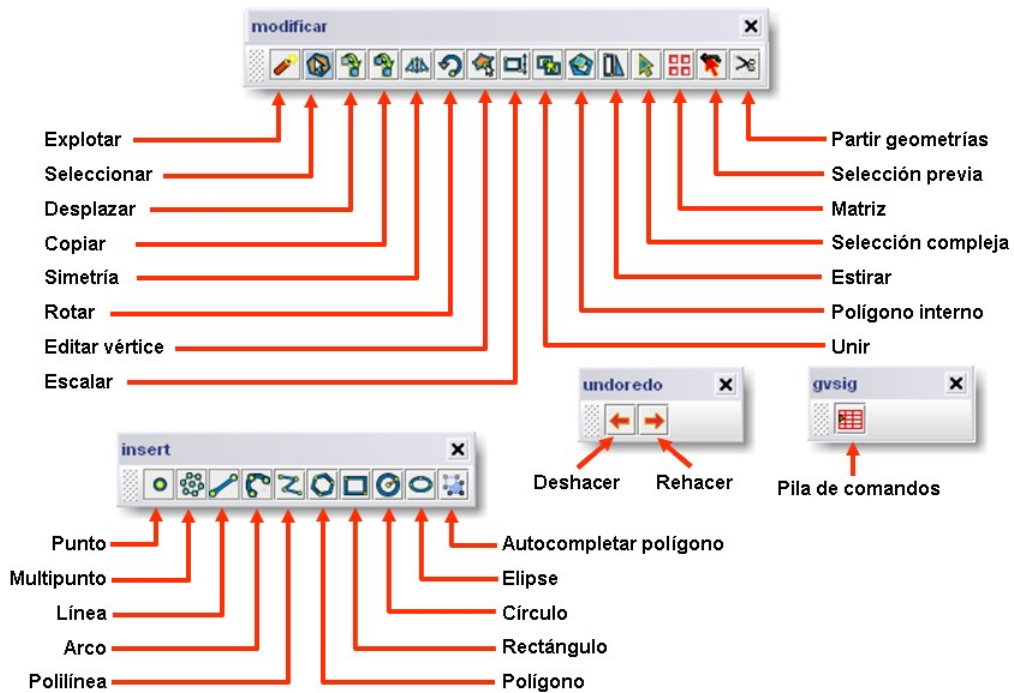


Fig.3.17.- Herramientas de edición gráfica en gvSIG (Palomar, J., 2010)

A través del comando Edición también resulta posible introducir distintos tipos de coordenadas (cartesianas, polares, relativas y absolutas).

3.2.2.1.2. Geoprocesamiento

El Geoprocesamiento es un comando de gvSIG que permite aplicar una serie de procesos estándar sobre las capas de información vectorial, generando nuevas capas de información vectorial que aportarán una nueva información, adicional a las capas iniciales. Los distintos procesos del comando se dividen en dos grandes grupos:

- Operaciones de **análisis**: permiten generar nueva información.
- Operaciones de **conversión de datos**: permiten cambiar el formato o la proyección.

Las principales operaciones de análisis son las siguientes:

- **Área de influencia:** Realiza una búsqueda por criterios de cercanía generando un polígono alrededor de la entidad y con el ancho especificado (figura 3.18).

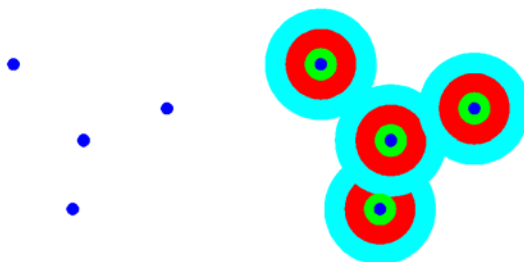


Fig.3.18.- Esquema de funcionamiento del geoproceso Área de influencia

- **Enlace espacial:** Une atributos mediante criterios espaciales (figura 3.19.)

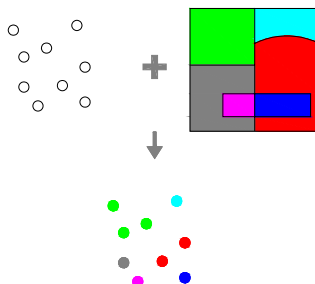


Fig.3.19.- Esquema de funcionamiento del geoproceso Enlace espacial

- **Recortar:** Extracción de la geometría (y atributos) en base a una capa de recorte determinada (figura 3.20.)

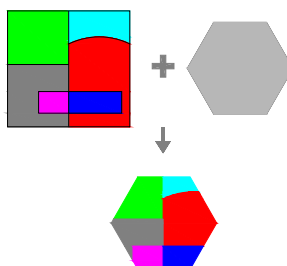


Fig.3.20.- Esquema de funcionamiento del geoproceso Recortar



- **Diferencia:** Operación de nivel gráfico similar al comando recortar pero proporcionando el polígono complementario (figura 3.21.)

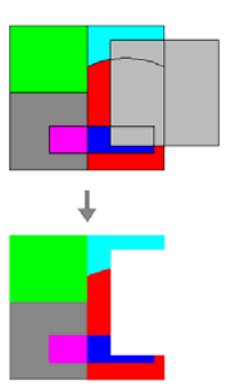


Fig.3.21.- Esquema de funcionamiento del geoproceso Diferencia

- **Intersección:** Operación a nivel gráfico y alfanumérico en la que se genera una nueva capa en la que únicamente se refleja la zona común a dos capas vectoriales (figura 3.22.)

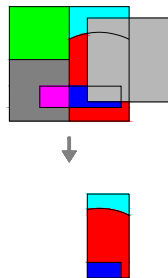


Fig.3.22.- Esquema de funcionamiento del geoproceso Intersección

- **Unión:** Operación a nivel gráfico y alfanumérico en la que se obtiene una nueva capa que contiene tanto las zonas comunes como no comunes entre dos capas vectoriales (figura 3.23.)

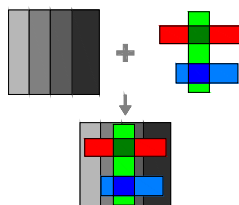


Fig.3.23.- Esquema de funcionamiento del geoproceso Unión

- **Geometría computacional:** Operación gráfica que permite generar un polígono de área mínima que engloba a un conjunto de elementos (figura 3.24.)

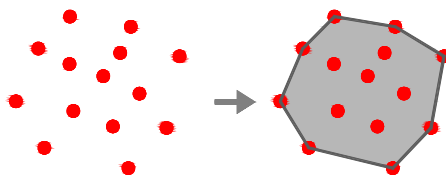


Fig.3.24.- Esquema de funcionamiento del geoproceso Geometría computacional

- **Agregación:** Permite la creación de un nuevo polígono con los límites no comunes entre dos capas que presentan límites adyacentes y tienen dos polígonos que comparten un mismo valor para un campo de atributos (figura 3.25.)

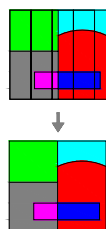


Fig.3.25.- Esquema de funcionamiento del geoproceso Agregación

Las operaciones de conversión de datos más usuales son las siguientes:

- **Juntar:** Permite la combinación de dos capas vectoriales con formato shp (shapefile) para crear una única capa vectorial (figura 3.26.)

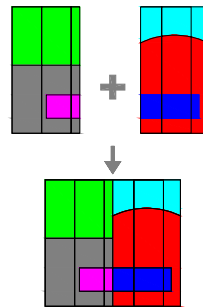


Fig.3.26.- Esquema de funcionamiento del geoproceso Juntar

- **Traslación 2D:** Aplica un movimiento de traslación a todos los elementos contenidos en una capa vectorial.
- **Reproyectar:** Permite la posibilidad de cambiar la proyección de un sistema a otro en una capa de forma permanente.

3.2.2.2. Tablas

El software gvSIG se fundamenta en un modelo de base de datos relacional, por ello, los datos se ordenan en tablas (comúnmente denominadas tablas de atributos) de forma que las filas (o registros) corresponden a los objetos geográficos y las columnas (o campos) a los atributos o variables temáticas. La intersección entre un registro y un campo da lugar a una celda (figura 3.27).

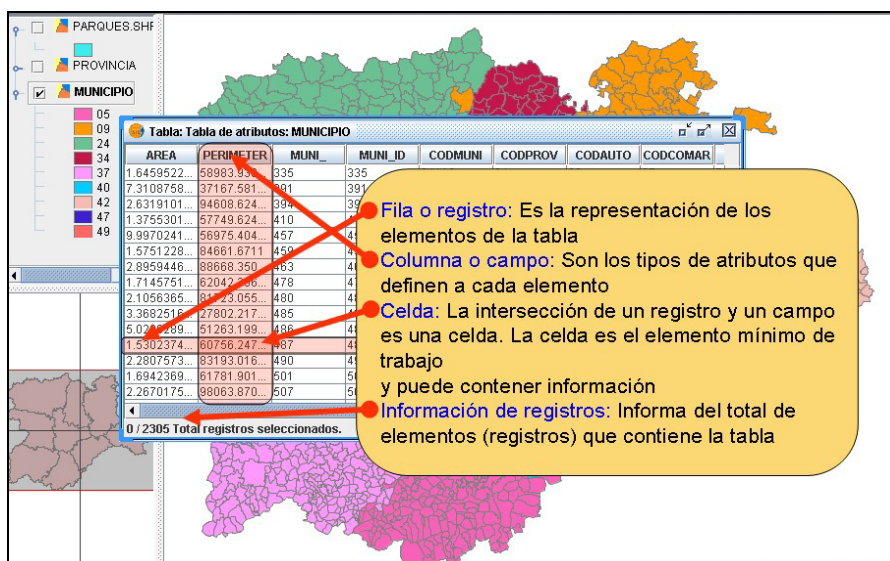


Fig.3.27.- Representación de una tabla de atributos en gvSIG (Palomar, J., 2010)



Existen varias formas de acceder a una tabla en el software gvSIG. Si se inserta una capa vectorial en formato shp, dicha capa ya incorpora una tabla de atributos con la información alfanumérica de la misma. No obstante también resulta posible incorporar una tabla remota cualquiera a través de un servidor web tipo WMS.

Al igual que ocurría con las vistas, gvSIG ofrece la posibilidad de editar tablas de atributos con la finalidad de crear, modificar y eliminar nuevos campos o registros. Resulta necesario constatar que aunque la mayoría de los comandos de edición de tablas mantienen de forma permanente el proceso a ejecutar, existen dos comandos (unir y enlace) cuyos resultados no se mantienen posteriormente de forma permanente y únicamente se pueden visualizar.

Los comandos de tablas de atributos más usuales son los indicados a continuación:

- **Unir:** Permite unir dos tablas mediante un campo común generando una única vista de tabla. El proceso de unión se lleva a cabo celda a celda es decir las cardinalidades son del tipo uno a uno.
- **Enlace:** Permite enlazar dos tablas mediante un campo común, en este caso si resulta factible establecer cardinalidades del tipo uno a muchos, es decir de una celda a varias.
- **Exportar:** Permite exportar la tabla a otros formatos (Excel, dbf, etc.).
- **Importar campos:** Este proceso es similar a la unión de tablas, salvo que el resultado es permanente es decir, los campos permanecen en la tabla original.
- **Insertar fila:** Añade una nueva fila en la tabla de atributos.
- **Eliminar fila:** borra una fila de la tabla de atributos.
- **Modificar estructura de la tabla:** Ofrece la posibilidad de borrar y añadir campos a la tabla especificando sus características en modo edición (nombre, tipo, ancho, número de decimales).
- **Orden ascendente:** Para un campo numérico ordena los valores de menor a mayor. Para un campo de texto ordena alfabéticamente empezando por la “A”
- **Orden descendente:** Para un campo numérico ordena los valores de mayor a menor. Para un campo de texto ordena alfabéticamente empezando por la “Z”

- **Estadísticas:** Genera un informe con los valores estadísticos básicos de un campo de la tabla. Tiene en cuenta las filas seleccionadas
- **Filtro:** Permite la consulta de la tabla mediante la aplicación de sentencias [campo] [operador] [valor] construidas a partir de un cuadro de diálogo.
- **Calculadora de campos:** Permite obtener valores nuevos en un campo a partir de la combinación o transformación de los valores de otros campos.

3.2.2.3. Mapas

La representación de la información geográfica introducida en forma de mapa debe constituir una función básica dentro de cualquier SIG ya que, estaría fuera de toda lógica que un sistema operase con información geográfica y que no fuera capaz de visualizarla. La creación de mapas en gvSIG es similar a cualquier otro SIG, en el mismo resulta posible introducir leyendas, escalas, cuadros de rotulación, textos adicionales, simbología, localizadores, etc. (figura 3.28.)

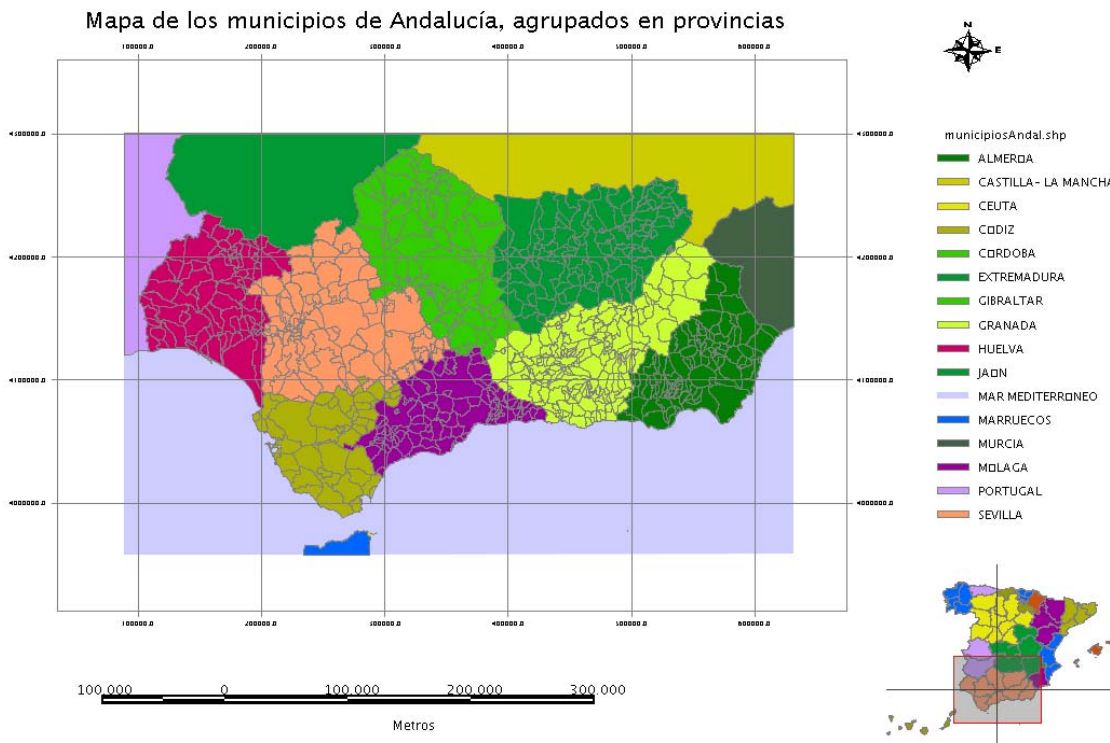


Fig.3.28.- Representación de un mapa de municipios en gvSIG (Palomar, J., 2010)



Los mapas creados pueden generarse en formato .pdf o en formato postscript el cual consiste en un formato de archivos gráficos ya preparado para su posterior impresión.

3.2.2.4. Extensiones

Aunque la mayoría de las aplicaciones están incluidas en gvSIG, algunas de ellas vienen implementadas a través de las llamadas Extensiones, éstas corresponden a comandos que se complementan con el software para aumentar las funcionalidades del mismo, las extensiones más conocidas son:

- Análisis de redes. Permite la creación y análisis de una red de transporte.
- Publicación de datos en Internet. Publicación de capas gvSIG en servidores cartográficos.
- Exportación a gvSIG Mobile. Permite la exportación de datos tratados en gvSIG desktop a la aplicación para móviles.
- NavTab. Extensión que permite la visualización y gestión de la información de tablas de una forma más cómoda.
- Sextante. Macroextensión que aporta más de 240 funciones o algoritmos para todo tipo de análisis, en su mayoría información tipo raster.

En la lista de extensiones anterior, hay una que por su importancia en el desarrollo de la presente Tesis, destaca por encima del resto, se trata de la extensión Sextante y a consecuencia de ello se describirá con mayor profundidad en apartados posteriores.

3.2.2.4.1. Sextante

Sextante es un SIG desarrollado por la Junta de Extremadura para satisfacer sus propias necesidades, especialmente adaptado para el análisis de datos geográficos, con especial énfasis en las actividades de gestión del medio y disciplinas afines. No obstante, Sextante es capaz de satisfacer la mayor parte de necesidades al respecto, en especial aquellas que pueden ser tratadas ventajosamente mediante un enfoque tipo raster, pues es en el manejo de este tipo de datos donde reside la verdadera fuerza del programa. Sus capacidades de proceso, separadas en módulos, trabajan mayoritariamente con información raster, existe un elevado y creciente número de módulos para procesar

información vectorial, y el núcleo central del programa está preparado igualmente para manejar con igual facilidad datos en ambos formatos.

Sextante está basado en el SIG alemán SAGA (System for Automated Geographical Analysis). El proyecto se adapta como una extensión a gvSIG proporcionándole una colección de más de 240 algoritmos.

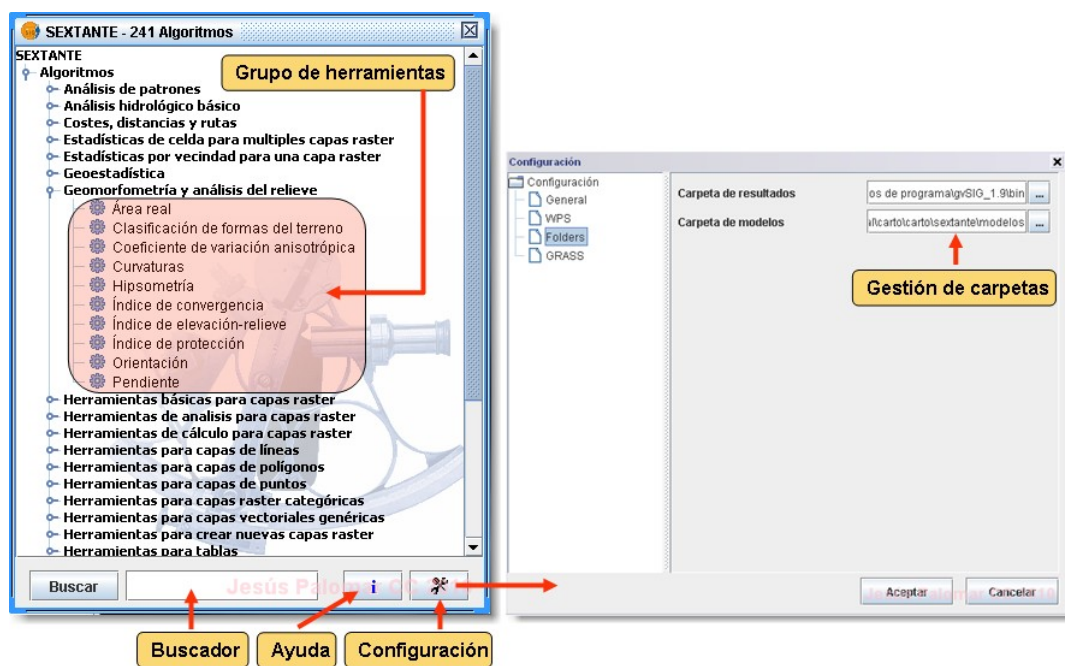







Fig. 3.29.- Gestor de Herramientas de Sextante (Palomar, J., 2010)

Los iconos mostrados en gvSIG que enlazan con la extensión Sextante son los siguientes:

- Gestor de herramientas : Permite abrir una ventana o cuadro de diálogo desde donde se puede acceder a las herramientas agrupadas por categorías, desde dicho gestor es posible llevar a cabo lo siguiente:
 - Visualización de herramientas. En el área de herramientas es posible mostrar un menú contextual que permite expandir o contraer la totalidad del árbol de herramientas e incluso observar cuales de los algoritmos que se encuentran activos es decir, aquellos que se pueden utilizar dependiendo de las capas cargadas en la vista.



- Ejecución de una herramienta. Únicamente hay que abrir la herramienta desde el gestor de herramientas y rellenar sus parámetros. Los datos fuente deben ser capas cargadas en la vista.
- Procesado por lotes. El gestor de herramientas permite el procesado de múltiples archivos a la vez. En este caso, los datos fuentes no son las capas cargadas en la vista sino ficheros en un directorio de disco duro.
- Modelos  : El modelizador permite encadenar procesos, cada uno de ellos realizado por una herramienta de SEXTANTE, y definir un proceso global (modelo) de utilización más sencilla como un diagrama de flujo.
- Línea de comandos  : Es posible abrir una consola que permite utilizar las herramientas de Sextante desde una línea de comandos, con lo que se puede generar pequeños scripts concatenando sentencias.
- Historial  : Todas las acciones llevadas a cabo con Sextante se registran en un historial. Éste puede posteriormente consultarse, así como ejecutar desde el mismo dichas acciones, facilitando la repetición de procesos.
- Resultados  : Los procesos de Sextante pueden generar distintos tipos de resultados: una capa nueva, texto, o un gráfico. En el primer caso, la capa se añade a la vista. En el caso de texto o gráfico, el resultado se añade a la ventana de resultados, estando accesible durante toda la sesión.

Las herramientas más usuales de Sextante que han sido utilizadas en el presente estudio son las siguientes:

- **Modulo de Geomorfometría y análisis del relieve:**
 - *Orientación*: Calcula la orientación del terreno a partir un modelo digital de elevaciones. Aunque para llevar a cabo este proceso están implementados diversos métodos, no existe gran diferencia entre ellos. El resultado que proporciona esta herramienta es una capa raster cuyo valor en la banda es la orientación del terreno en grados o radianes medidos desde el norte en sentido horario.



- *Pendiente*: Calcula la pendiente del terreno a partir un modelo digital de elevaciones. El resultado que proporciona esta herramienta es una capa raster cuyo valor en la banda es la pendiente del terreno en grados, radianes o porcentaje.
- **Módulo de Herramientas básicas para capas raster.**
 - *Cortar capa raster con capa de polígonos*: Permite recortar una capa raster de manera que adquiera la forma de una capa de polígonos. Es especialmente útil para adelgazar el tamaño de las capas raster a la zona de estudio.
- **Módulo de Herramientas para capas de polígonos.**
 - *Estadísticas de grid en polígonos*: Permite extender la información contenida en la tabla de atributos de una capa vectorial añadiendo datos procedentes de una o más capas raster que representen la misma área geográfica. El resultado que proporciona la herramienta es una capa vectorial con la tabla de atributos de la capa vectorial origen a la que se le han añadido cuatro campos más: media, valor máximo, valor mínimo, y varianza de los valores que toman los pixeles que se superponen con cada polígono.
 - *Estadísticas de puntos en polígonos*: Es análoga a la anteriormente descrita pero en lugar de trabajar con una capa raster y valor de un pixel lo hace con una capa vectorial y valor en un punto.
- **Reclasificación de capas raster.**
 - *Reclasificación*: Modifica los valores de una capa raster y genera otra ya clasificada. Para ello resulta necesario introducir la capa raster a clasificar y una tabla de asignación en la que se introducirán los nuevos valores que adoptaran los pixel situados en intervalos previamente definidos a través de su valor mínimo y máximo.
- **Vectorización.**
 - *Capa raster a capa de puntos*: Permite generar una capa vectorial de puntos a partir de una capa raster. Es interesante cuando se desea llevar a cabo operaciones sobre la información de una capa raster pero, dichas operaciones sólo se pueden aplicar sobre capas vectoriales.



En la presente Tesis se ha recurrido al empleo y utilización tanto del software gvSIG como de la extensión Sextante ya que, se complementan con tal grado de detalle que la combinación entre ambos permite, por un lado ofrecer un mayor número de funcionalidades y por otro, realizar operaciones conjuntas con el objetivo de facilitar y favorecer los procesos de cálculo y análisis.

3.3. Referencias bibliográficas del Capítulo III

- Aronoff, S. (1989). *Geographic Information System: A management perspective*. Ottawa, WDL Publications.
- Byrne, J., Zhou, A., Shen, B. y Hughes, K. (2007). Evaluating the potential of small-scale renewable energy options to meet rural livelihoods needs: A GIS- and lifecycle cost-based assessment of Western China's options. *Energy Policy*. 35. pp 4391-4401.
- Cebrián, J.A. (1988). *Sistemas de información Geográfica en Aplicaciones de la Informática a la Geografía y Ciencias Sociales*. Síntesis. Madrid, pp. 87-110.
- Coppock J.T. y Rhind D.W., 1991, The History of GIS. Maguire D.J., Goodchild M.F., and Rhind D.W. (editors) *Geographical Information Systems: Principles and Applications*, London, Volume 1, pages 21-43.
- Domínguez Bravo, J., García Casals, X. y Pinedo Pascua, I. (2007). GIS approach to the definition of capacity and generation ceilings of renewable energy technologies. *Energy Policy*. 35. pp 4879-4892.
- ESRI, *Editing in ArcMap*, Environmental Systems Research Institute, Inc., ESRI Press, Redlands, USA, 2003.
- Felicísimo, A.M. (2003). Curso de MDT, <http://www.etsimo.uniovi.es>
- Foresman, T.M. (1998). GIS Early Years and Threads of Evolution. *History of Geographic Information Systems: Perspectives from the pioneers*. Prentice Hall, London, pp. 3-17
- Goodchild, M.F., Rhind, D.W. y Maguire, D.J. (1991). *Geographical Information Systems*. Longman. London.
- Gutiérrez Puebla, J. y Could, M. (1994). *Sistemas de Información Geográfica*. Editorial Síntesis. Madrid.



- Joly, F. (1982). *La Cartografía*. Editorial Ariel. Barcelona
- Martín, J. (1980). *Organización de las bases de datos. 1ª Edición*, Prentice Hall. USA.
- Palomar Vázquez, J. (2010). *Curso de gvSIG 1.9: Introducción a gvSIG*, Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección, Universidad Politécnica de Valencia.
- Reeve, D. (2000). Bases de datos, estructuras y modelos de datos espaciales. Módulo 3. *Máster Internacional a Distancia en Sistemas de Información Geográfica*. Universidad de Girona. Girona.
- Santos Preciado, J.M. (2004). *Sistemas de Información Geográfica. Unidad Didáctica UNED*. Universidad Nacional de Educación a Distancia. Madrid.
- Sorensen, B. y Meibom, P. (1999). GIS tools for renewable energy modelling. *Renewable Energy*. 16. pp 1262-1267.
- Tiba, C., Candeias, A.L.B., Fraidenraich, N., de S. Barbosa, E.M. y Carvalho Neto, P.B. (2010). A GIS-based decision support tool for renewable energy management and planning in semi-arid rural environments of northeast of Brazil. *Renewable Energy*. 35. pp 2921-2932.
- Tomlinson, R. F. (1998). The Canada Geographic Information System. *History of Geographic Information Systems: Perspectives from the pioneers*. Prentice Hall, London, pp. 21-32.
- Van Hoesen, J. y Letendre, S. (2010). Evaluating potential renewable energy resources in Poultney, Vermont: A GIS-based approach to supporting rural community energy planning. *Renewable Energy*. 35. pp 2114-2122.
- Vázquez Maure, F. y Martín López, J. (1995). Lectura de mapas. *Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Topográfica*. Madrid.
- Voivontas, D., Assimacopoulos, D. y Mourelatos, A. (1998). Evaluation of renewable energy potential using a GIS decision support system. *Renewable Energy*. Vol. 13. Nº 3. pp 333-344.
- Yue, C.D. y Wang, S.S. (2006). GIS-based evaluation of multifarious local renewable energy sources: a case study of the Chigu area of southwestern Taiwan. *Energy Policy*. 34. pp 730-742.



SEGUNDA PARTE:

METODOLOGÍA



CAPÍTULO IV

TOMA DE DECISIONES Y SOFT COMPUTING





*“Las ciencias tienen las raíces amargas,
pero muy dulces los frutos”.*

Aristóteles

CAPÍTULO IV

TOMA DE DECISIONES Y SOFT COMPUTING

4.1. La Toma de Decisiones.

4.1.1. Introducción

En infinidad de ocasiones y de manera inconsciente a consecuencia de la cotidianidad de sus actos, el ser humano se encuentra en la necesidad de tener que responder cuestiones prácticamente a diario en las que, debe seleccionar entre varias alternativas aquella que considere que es la mejor opción. Trasladando esta necesidad al ámbito profesional, seleccionar la mejor alternativa es todavía si cabe, de mayor importancia.

Un problema de decisión surge cuando para dar respuesta a una situación planteada existen dos o más alternativas entre las que, de manera individual o colectiva, es necesario escoger una de ellas o al menos indicar una serie de preferencias.

Una decisión se considera acertada si con el transcurso del tiempo los efectos de la misma son favorables. No obstante, en multitud de ocasiones se desconoce qué hubiera ocurrido si se hubiese optado por una decisión diferente. A consecuencia de ello, es de extrema importancia conocer el proceso de decisión que se llevó a cabo ya que se podrá saber con certeza si la decisión escogida inicialmente era la mejor opción.

Aunque en cualquier ámbito los procesos de toma de decisiones son idóneos, es a nivel profesional cuando su importancia alcanza el grado de esencial. En el campo de los proyectos de ingeniería, a consecuencia de la complejidad y la trascendencia de la decisión, los procesos de toma de decisiones constituyen una actividad intelectual imprescindible, sin la cual el proyecto no puede progresar.



Habitualmente, los procesos de toma de decisiones se fundamentan en el conocimiento y la experiencia del grupo decisor ante situaciones similares ocurridas con anterioridad, en cambio, resulta bastante infrecuente que se recurra al uso de alguna metodología o herramienta que permita ayudar en la toma de decisión. Por ello, el Análisis de Decisión Multicriterio (Multicriteria Decision Analysis) constituye una valiosa herramienta para ayudar al decisor durante este proceso de toma de decisiones.

En la presente Tesis Doctoral se aplicarán diversos métodos de decisión multicriterio (MCDM) que se detallarán con mayor profundidad en el capítulo siguiente, no obstante, este capítulo permitirá establecer una primera toma de contacto con este tipo de procesos describiendo los fundamentos y los orígenes de los mismos.

4.1.2. Proceso de toma de decisión multicriterio

El proceso de toma de decisiones se muestra en el esquema de la Figura 4.1.: “La toma de decisiones es un proceso de selección entre cursos alternativos de acción, basado en un conjunto de criterios, para alcanzar uno o más objetivos” (Simon, H., 1960).

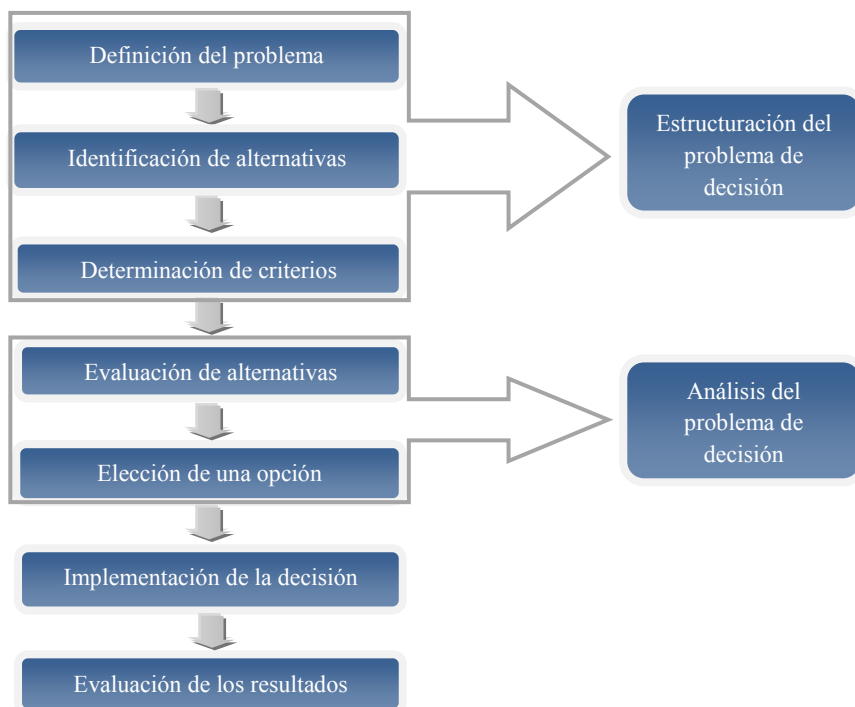


Fig. 4.1.- Esquema proceso de toma de decisión multicriterio



Estructuración del problema de decisión

El problema de decisión multicriterio se puede estructurar de la siguiente forma:

- **Definición del problema:** Es el paso inicial para la toma de decisión, sin un problema correctamente definido no resulta posible obtener una solución válida ya que el objetivo no está claramente definido.
- **Identificación de las alternativas:** es la captura y recopilación de la cantidad de opciones que tiene el decisor para llevar a cabo la decisión.
- **Determinación de criterios:** Consiste en la evaluación de las alternativas mediante aquellas características que los decisores han considerado relevantes para determinar la alternativa que resulta más conveniente. Existen dos tipos de criterios: cualitativos y cuantitativos.

Análisis del problema de decisión

Es la parte del proceso de toma de decisión consecuente con la estructuración del problema de decisión, comprende las siguientes etapas:

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

Implementación de la decisión

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

Evaluación de los resultados

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



4.1.3. Referencias históricas sobre la decisión multicriterio

La decisión multicriterio aparece en el campo de la economía a finales del siglo XIX y principios del XX al analizar el comportamiento de los consumidores a la hora de elegir la compra de un producto.

La formulación adoptada en esta época consistía en postular que los agentes económicos buscaban maximizar sus funciones de utilidad, las cuales expresaban la elección del consumidor. Sin embargo, en 1896 Pareto mostró que en situaciones en las que varios agentes económicos realizan elecciones diferentes y en conflicto, éstos no podían obtener su satisfacción máxima al mismo tiempo; “siendo los recursos limitados, lo que uno gana lo hace en detrimento de otro”, estas situaciones se denominan óptimos de Pareto. Con el objeto de resolver esta problemática intentando alcanzar un equilibrio entre diferentes intereses surgieron las técnicas de decisión multicriterio.

Los orígenes de las técnicas de toma de decisión multicriterio se remontan al siglo pasado, sus inicios datan de la década de los cuarenta. En 1944, El padre de la física cuántica John Von Neumann, y Oscar Morgenstern (economista austriaco), publicaron la primera edición de juegos de estrategia desde una perspectiva económica y la más importante en lo que se refiere al comportamiento del individuo en una situación de riesgo. Su título es “Theory of games and economic behaviour” (Von Neumann, J. y Morgenstern, O., 1944), y plantea una aproximación metodológica en la que, para resolver el problema de la decisión en régimen de conflicto, se debe plantear la racionalidad del individuo. Entre las diversas interpretaciones que se realizaron posteriormente destaca la que realizaron Luce y Raiffa en 1957.

El matemático francés Bernad Roy planteó en 1968 un nuevo enfoque de la ayuda a la decisión. Este autor es el inspirador de la escuela francesa y fundador del Laboratorio de Análisis y de Modelización de los Sistemas de Ayuda a la Decisión (LAMSADE). Sus métodos se fundamentan en la comparación de diferentes alternativas entre sí en base a cada criterio y después agregar la información obtenida considerando la fuerza de las evidencias a favor y en contra de la selección de una alternativa respecto a otra. Los



métodos más conocidos son los de la familia ELECTRE y la familia PROMETHEE, métodos denominados de sobreclasificación (relaciones “outranking”).

En los años 70, la escuela americana (concretamente en EEUU) estudió la posibilidad de agregar las preferencias del decisor por cada criterio en una única función “suma” de las anteriores. Esta función de utilidad global constituye el punto de partida del problema de programación matemática multiobjetivo cuyo fundamento está basado en la Teoría de la Utilidad Multiatributo (MAUT). En esta línea destacan los estudios realizados en el año 1976 por Keeney y Raiffa.

A finales del siglo XX, los métodos de toma de decisión multicriterio (MCDM, del inglés Multi-Criteria Decision Making) comenzaron a trascender del ámbito académico y se fueron extendiendo al ámbito público y empresarial. Hoy en día estas técnicas se emplean con múltiples y diversas finalidades: localización de empresas, selección de maquinaria o contratistas, etc. No obstante, todavía son muchas las aplicaciones que quedan por explotar.

Los problemas multicriterio se clasifican en dos categorías, los de programación múltiple objetivo y los de evaluación multicriterio. La presente Tesis se centrará en los de la segunda categoría. La mayoría de estos métodos pertenecen a dos escuelas principales de métodos multicriterio, la escuela Americana y la escuela Europea

4.1.3.1. La escuela americana

En 1944 Von Neuman y Morganstern asentaron las bases de la Teoría de la Utilidad Multi-atributo (MAUT), como aplicación en econometría.

Los métodos dentro de la MAUT parten del supuesto de que el decisor trata de maximizar una función de utilidad que agrega los distintos criterios que intervienen en el problema. Cuando el problema es discreto y no existen una situación de incertidumbre, esta función se denomina función valor que asocia un número real a cada una de las alternativas de forma que, dicho número refleja el valor que le otorga el decisor a dicha alternativa.



MAUT asume que un problema de decisión puede modelizarse mediante funciones valoradas reales que pueden ser maximizadas/minimizadas entre las alternativas. La principal dificultad de estos métodos consiste en encontrar dicha función valor y, una vez obtenida, el problema de decidir la mejor de las alternativas se reduce a obtener el máximo/mínimo de todos los valores calculados.

Basados en la existencia de la función valor la escuela americana propone varios métodos prácticos, como son los métodos de la suma ponderada y el método de las Jerarquías Analíticas o Proceso Analítico Jerárquico (AHP).

El método de la suma ponderada

El método de la Suma ponderada calcula la ponderación de las alternativas como resultado del sumatorio del producto del peso de cada variable por el valor que toma para esa alternativa la variable correspondiente

Los datos del método son expresados en una matriz de valoración normalizada en la que los valores de los criterios (w_j) son comparados y se evalúa para cada alternativa el grado de cumplimiento de cada uno, posteriormente se construye la función valor que refleja el valor que cada alternativa presenta para el decisor, ordenando las alternativas en base a dichos valores se puede resolver el problema de decisión y determinar la mejor alternativa.

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

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

Donde $v(A_i)$ es un valor promedio ponderado para cada alternativa A_i , que refleja el valor que cada alternativa tiene para el decisor. Así pues, con la ordenación de las



alternativas en base a los valores $v(A_1)$, $v(A_2)$, ..., $v(A_m)$ es posible resolver el problema de decisión y determinar la mejor alternativa de entre las posibles, que será la de suma ponderada mayor/menor.

En casos unidimensionales es decir, todas las alternativas tienen las mismas unidades (ejemplo: metros, kg, etc.), el método de la suma ponderada puede ser utilizado sin apenas dificultad. No obstante, es en problemas MCDM multi-dimensionales, donde surgen las dificultades para aplicar este método (Triantaphyllou, E., 2000)

El Proceso Analítico Jerárquico

El Proceso Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Process- AHP) es un modelo de decisión desarrollado por Thomas Saaty en 1980 que interpreta los datos y la información directamente mediante la realización de juicios y medidas en una escala de razón dentro de una estructura jerárquica establecida. Es un método de selección de alternativas (estrategias, inversiones, etc.) en función de una serie de criterios o variables, las cuales suelen estar en conflicto.

Las tres principales características del método AHP son las siguientes:

- El problema de decisión se modeliza mediante una jerarquía en cuyo vértice superior está el principal objetivo del problema, y en la base se encuentran las posibles alternativas a evaluar. En los niveles intermedios se representan los criterios en base a los cuales se toma la decisión.
- Se realizan comparaciones entre pares de elementos en cada nivel de la jerarquía, en función de la importancia de cada uno al elemento del nivel superior
- Proporciona la contribución global de cada alternativa al objetivo principal o meta mediante una agregación de tipo aditivo.
- Los criterios de decisión han de ser independientes entre sí de forma que no puede existir relaciones de interdependencia entre los criterios en el modelo jerárquico.

Partiendo de la última característica de AHP surge una nueva metodología propuesta también por Saaty en el año 1996, para el caso en el que no se tiene la certeza absoluta de que los criterios son independientes entre sí, dicha metodología se denomina Proceso



Analítico en Red ó método ANP (Analytic Network Process) y al contrario de lo que sucede con el método AHP, en el método ANP se representa el problema de decisión como una red en las que son posibles las relaciones de interdependencia y realimentación entre todos sus elementos.

4.1.3.2. La escuela europea

En la mitad de la década de los ochenta, el matemático francés Bernad Roy fundó la denominada escuela francesa. Los estudios realizados en años posteriores (Roy, B., 1991) y la contribución de varios científicos europeos establecieron la base de la metodología de Ayuda a la Decisión Multicriterio a través de una serie de métodos que persiguen ayudar al decisor a resolver el problema teniendo en cuenta las dificultades que se derivan para la construcción de la función valor. Se describen por su importancia, los métodos ELECTRE (The ELimination Et Choix Traduisant la REalité) y los métodos PROMETHEE (Preference Ranking Organization meted of Enrichement Evaluations), métodos también llamados de sobreclasificación.

Método ELECTRE

Una de las familias de MCDM más conocidas es la familia de métodos ELECTRE, y desde su aparición (Roy, 1968) ha sido ampliamente desarrollada (Roy y Bouyssou, 1993). El método ELECTRE pertenece a una familia de métodos basados en relaciones de superación o sobreclasificación (outranking) para decidir acerca de la determinación de una solución, que sin ser óptima pueda considerarse satisfactoria; además de obtener una jerarquización de las acciones o alternativas bajo análisis. Desde que apareció el primer método denominado ELECTRE I, se han ido realizando aportaciones posteriores las cuales se enumeran a continuación:

- ELECTRE I (Roy, B., 1968)
- ELECTRE II (Roy y Bertier, 1971, 1973)
- ELECTRE III (Roy, B., 1978)
- ELECTRE IV (Roy y Hugonnard, 1982 a y b)
- ELECTRE IS (Roy y Skalka, 1985)



- ELECTRE TRI (Roy y Bouyssou, 1991) (Yu, 1992 a y b)

El último método de la familia ELECTRE denominado ELECTRE TRI es probablemente el más utilizado en la actualidad.

Método PROMETHEE

El método PROMETHEE fue desarrollado por Vinke y Brans en 1985, pertenece a la clase de métodos que utilizan las relaciones de superación o sobreclasificación de unas alternativas sobre otras es decir, utilizan como mecanismo básico el de las comparaciones binarias de alternativas (comparaciones dos a dos de las alternativas, criterio por criterio).

Otras variantes del método plantean situaciones más sofisticadas de decisión, por ello se han desarrollado las versiones PROMETHEE II, PROMETHEE III, PROMETHEE IV y PROMETHEE V.

4.2. Soft Computing

Con la introducción del concepto de conjunto difuso (Zadeh, 1975), se extendió su popularidad al concepto de variables provocando un aumento extraordinario en el uso de la lógica difusa.

En la presente Tesis se recurrirá al uso de variables lingüísticas, y sus términos asociados, concretamente se utilizarán números difusos triangulares para la modelización de variables lingüísticas, los cuales se aplicarán en métodos de decisión multicriterio.

Para ello con carácter previo se describirán los fundamentos de la Soft Computing (SC) y se centrará la atención particularmente en la lógica difusa (fuzzy logic) y el modelado lingüístico difuso ya que serán utilizados posteriormente en los diferentes MCDM a aplicar.



Con el objetivo de buscar las soluciones óptimas en los problemas correctamente planteados, se han ido elaborando y desarrollando teorías en los diversos campos en los que surge la cuestión a resolver. Entre los diferentes problemas a resolver existe una clase de problemas asociados a la búsqueda del máximo o mínimo de una determinada función, son los denominados problemas de optimización los cuales se sitúan en el campo de la Programación Matemática.

La combinación de los problemas de Programación Matemática con elementos de carácter difuso permite crear los denominados métodos de optimización difusos los cuales logran dar respuesta a una gran variedad de aplicaciones reales aunque no en su totalidad.

El extraordinario avance que ha sufrido el campo de la informática ha permitido resolver problemas reales de dimensión cada vez mayor. No obstante, si al hecho de que conocer la totalidad de soluciones posibles en dichos problemas es aún un objetivo, se le añade la necesidad de obtener respuestas a situaciones reales en la totalidad de campos, surge la necesidad de crear herramientas capaces de obtener respuestas donde los algoritmos exactos no logran encontrarlas. A consecuencia de ello, en estos últimos años se han ido desarrollando un conjunto de herramientas que, en lugar de buscar la solución óptima, se centran en obtener una solución que satisfaga al usuario en algún aspecto previamente definido.

Inicialmente, los conceptos que maneja la Soft Computing (SC) eran tratados de forma aislada, indicando el empleo de metodologías fuzzy. Más recientemente, Verdegay, Yager y Bonissone (2008) han presentado una definición más precisa e ilustrativa de lo que es la Soft Computing en la actualidad, en los siguientes términos:

“El punto de vista que aquí consideramos es otra forma de definir la Soft Computing, por medio de la cual se la considera como la antítesis de los que podríamos llamar Hard Computing. Este punto es consistente con los presentados por Zadeh en 1994 y 2001. La Soft Computing puede, por tanto, verse como una serie de técnicas y métodos con las que manejar las situaciones prácticas reales en la misma manera que los humanos



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

4.2.1. La lógica difusa

La lógica difusa pretende manejar el conocimiento propio del “sentido común” (bajo, bastante, escaso, etc.), se trata de una generalización de la lógica booleana (lógica clásica, de verdadero o falso) propuesta por Zadeh en 1965. Tiene por finalidad de manejar el concepto de verdades parciales situadas entre el “completamente verdadero” y el “completamente falso”.

4.2.1.1. Conjunto difuso

El conocimiento que se tiene de un conjunto refleja la idea de agrupar colecciones de objetos que cumplen una o varias propiedades que caracterizan a dicho conjunto. Una propiedad puede ser considerada como una función que a cada elemento del universo de discurso U le asigna un valor en el conjunto $\{0, 1\}$, de forma que si el elemento pertenece al conjunto (cumple la propiedad) se le asigna el valor 1 o, en caso contrario el valor 0.

La mayoría de las categorías que describen los objetos del mundo real no tienen unos límites claros y definidos, por ejemplo: persona joven, la palabra joven es una fuente de imprecisión pues, ¿qué medida o baremo permite indicar si una persona es joven o no lo es?. Si un objeto pertenece a una categoría con un grado de pertenencia que puede ser expresado por un número real en el intervalo $[0,1]$, cuanto más cercano a 1 sea el grado, indicará mayor pertenencia a dicha categoría y cuanto más se aproxime a 0, indicará menor pertenencia. Por ende, un conjunto difuso puede definirse como una colección de objetos con valores de pertenencia entre 0 (exclusión total) y 1 (pertenencia total).

Definición IV.1.- Un conjunto \tilde{A} sobre un dominio o universo de discurso U está caracterizado por una función de permanencia

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

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

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

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

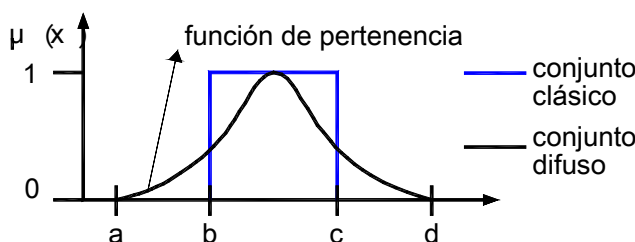


Fig. 4.2.- Ejemplo de función de pertenencia de un conjunto difuso (García Cascales, M.S., 2009).

Claramente un conjunto difuso es una generalización del concepto de conjunto cuya función de permanencia toma sólo dos valores. En la figura 4.2. se observa un ejemplo de función de pertenencia en comparación con lo que podría ser el equivalente en conjuntos clásicos del mismo concepto.

4.2.1.2. Tipos de funciones de pertenencia

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

Los conjuntos difusos suelen representarse con familias de funciones paramétricas, las más comunes son las siguientes:

- Función Triangular (fig.4.3.)

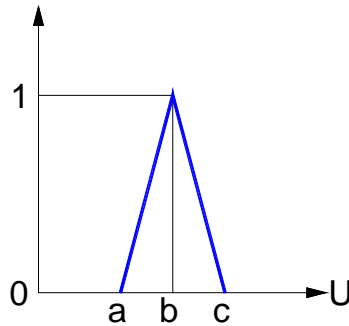


Fig. 4.3.- Función pertenencia triangular

Donde:

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

Siendo b el punto modal de la función triangular y a, c los límites inferior y superior respectivamente para los valores no nulos de $\mu_A(u)$.

- Función trapezoidal (fig. 4.4.):

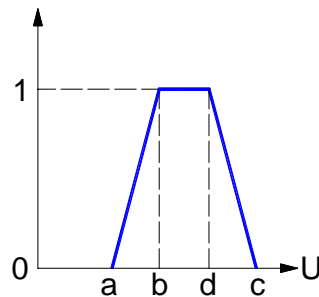


Fig. 4.4.- Función de pertenencia trapezoidal (Klir, G.J. y Yuan, B.,1995)

Donde:

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

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

- Función Gaussiana (fig. 4.5.)

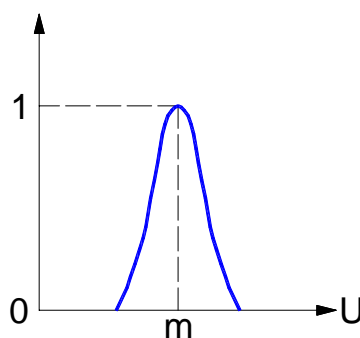


Fig.4.5.- Función de pertenencia Gaussiana

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

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

4.2.1.3. Números difusos

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

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

Bajo ciertas condiciones, estos conjuntos difusos pueden ser vistos como números difusos o intervalos difusos.



Definición IV.2.- Un número difuso \tilde{A} es un subconjunto de \mathfrak{R} que verifica las siguientes propiedades:

1. La función de pertenencia es convexa

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

2. Para cualquier $\alpha \in (0,1]$, \tilde{A}_α debe ser un intervalo cerrado
3. El soporte de \tilde{A} debe ser finito
4. \tilde{A} está normalizado,

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

Casos particulares de números difusos:

- Los números reales (fig. 4.6.a)
- Intervalos de números reales (fig. 4.6.b)
- Valores aproximados (fig. 4.6.c)
- Intervalos aproximados o difusos (fig. 4.6.d)

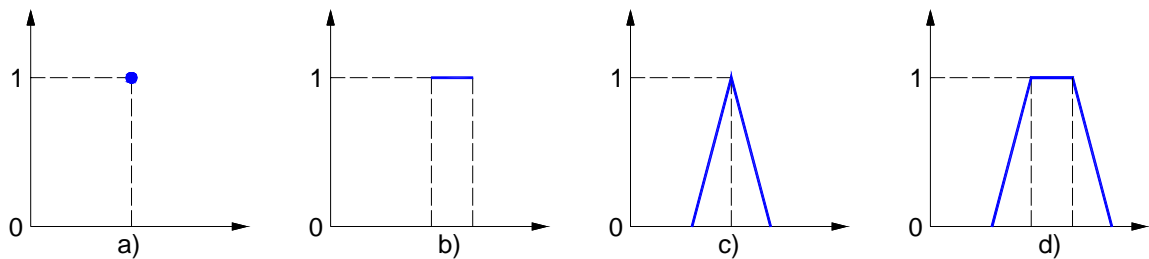


Fig. 4.6.- Ejemplos de números difusos (Klir, G.J. y Yuan, B., 1995)

Definición IV.3.- Un número real difuso \tilde{A} se describe como un subconjunto difuso de la recta real \mathfrak{R} por medio de una función de pertenencia f_A que tiene las siguientes propiedades:

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



5. $f_A(x)$ es estrictamente decreciente en $[c,d]$;
6. $f_A(x) = 0$ para todo $x \in (d, \infty]$;

Donde a, b, c y d son números reales.

Se considerará que A es convexo, normal y acotado ($-\infty < a, d < \infty$)

Definición IV.4.- El número difuso \tilde{A} será triangular si su función de pertenencia está dada por:

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

Donde a, b y c son números reales.

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

Donde

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

Teniendo en cuenta la *Definición IV.3*, es obvio que $f_A^L(x)$ es la parte izquierda de la función de pertenencia del número difuso \tilde{A} , es continua y estrictamente creciente en $[a,b]$ y $f_A^R(x)$ es la parte derecha de la función de pertenencia del número difuso \tilde{A} , es continuo y estrictamente decreciente en $[b,c]$.

Propiedades:

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

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

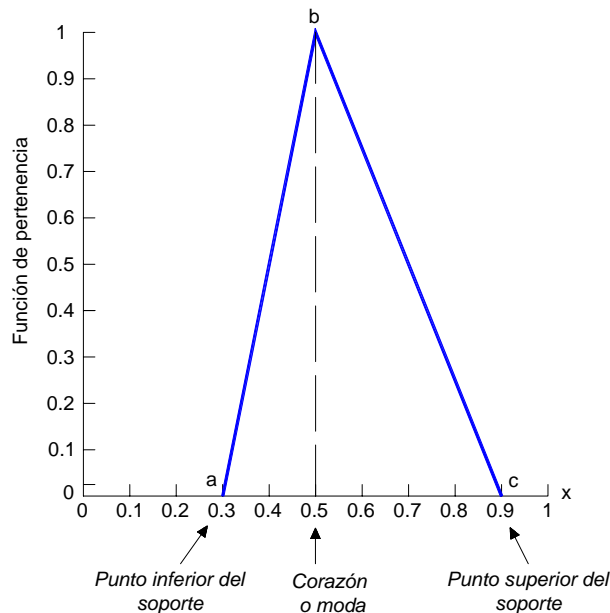


Fig. 4.7.- Número difuso triangular con sus tres puntos fundamentales (a,b,c)
(García-Cascales, M.S. y Lamata, M.T.,2007).



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

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

4.2.1.4. Operaciones con números difusos

Sean \tilde{A} y \tilde{N} dos números triangulares difusos parametrizados por las triplas (a_1, b_1, c_1) y (a_2, b_2, c_2) respectivamente, las operaciones con tales números son de la forma siguiente:

Suma de números difusos:

$$\tilde{A} \oplus \tilde{N} = [a_1 + a_2, b_1 + b_2, c_1 + c_2] \quad (4.1)$$

Sustracción de números difusos:

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

$$\tilde{A} \ominus \tilde{N} = [a_1 - c_2, b_1 - b_2, c_1 - c_2] \quad (4.2)$$

Multiplicación de números difusos:

$$\tilde{A} \otimes \tilde{N} = [a_1 \times a_2, b_1 \times b_2, c_1 \times c_2] \quad (4.3)$$

División de números difusos:

$$\tilde{A} / \tilde{N} = [a_1, b_1, c_1] \cdot \left[\frac{1}{c_2}, \frac{1}{b_2}, \frac{1}{a_2} \right], \quad 0 \neq [a_2, b_2, c_2] \quad (4.4)$$

Multiplicación por un escalar:

$$k \circ \tilde{A} = [k \circ a_1, k \circ b_1, k \circ c_1] \quad (4.5)$$

Raíz cuadrada:

$$T_1^{1/2} = [a_1^{1/2}, b_1^{1/2}, c_1^{1/2}] \quad (4.6)$$

Máximo y mínimo:

$$\begin{aligned} \text{Max}(\tilde{A}, \tilde{B}) &= [\text{Max}(a_1, a_2), \text{Max}(b_1, b_2), \text{Max}(c_1, c_2)] \\ \text{Min}(\tilde{A}, \tilde{B}) &= [\text{Min}(a_1, a_2), \text{Min}(b_1, b_2), \text{Min}(c_1, c_2)] \end{aligned} \quad (4.7)$$

4.2.1.5. Ordenación de números difusos

Cuando los datos difusos se incorporan dentro de un modelo de decisión multicriterio (MCDM), la evaluación resultante final proporciona valores difusos. Partiendo de que un valor difuso representa muchos posibles valores reales que tienen diferentes valores de pertenencia, no resulta fácil comparar la evaluación final para determinar cuál de las alternativas es la preferida. Por tanto, los números difusos no siempre proporcionan un conjunto completamente ordenado como los números reales.

Para resolver el problema de la comparación de números difusos, muchos autores han propuesto métodos de ordenación (el estudio de la ordenación difusa comenzó en los inicios de los años 70), el presente proyecto se centrará únicamente en uno de ellos, ya que engloba a muchos de los utilizados normalmente en la literatura, concretamente el proceso de ordenación de García-Cáscales y Lamata.

4.2.1.5.1. Proceso de ordenación de García-Cáscales y Lamata

Un número difuso triangular está definido por tres puntos (a , b , c). Los métodos utilizados en la literatura únicamente utilizan los extremos, sin prestar excesiva atención al punto central, siendo éste un elemento clave del número difuso, (figura 4.8.)

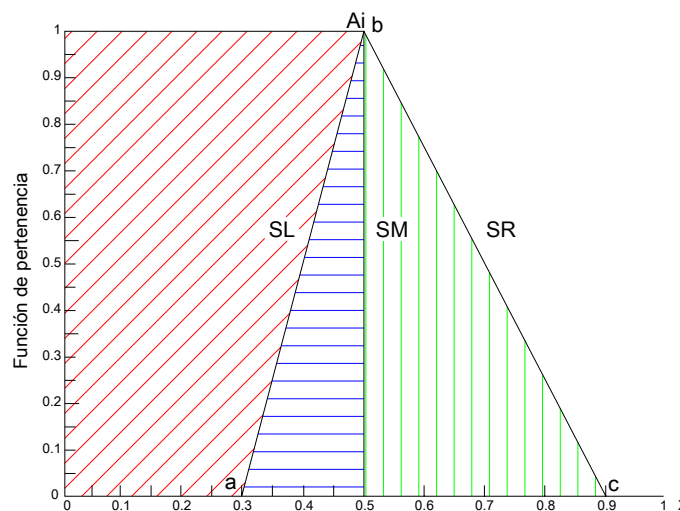


Fig. 4.8.- Representación de $S_L(A_i)$, $S_M(A_i)$ y $S_R(A_i)$
(García-Cascales, M.S. y Lamata, M.T., 2007).



Mediante la utilización de números difusos triangulares y considerando la aproximación de Liou y Wang (1992) junto con la de García-Cascales y Lamata (2007), para un decisor totalmente neutral se obtiene el siguiente índice:

$$I_{1/3,1/2}(A_i) = \frac{1}{3} \left(\frac{a + 4b + c}{2} \right) \quad (4.8.)$$

Dicho índice permite ordenar números difusos en concordancia con la modalidad y optimismo de la aptitud del decisor.

4.2.2. Semántica del conjunto de términos lingüísticos

El modelado lingüístico, presenta como base la Teoría de Conjuntos Difusos y se ha mostrado como una técnica eficaz para valorar aspectos de la naturaleza cualitativa. Para representar los aspectos cualitativos como valores lingüísticos, se utilizan variables lingüísticas.

Una variable lingüística según Zadeh (1975) se caracteriza por un valor sintáctico o etiqueta y por un valor semántico o significado. La etiqueta es una palabra o frase perteneciente a un conjunto de términos lingüísticos y el significado de dicha etiqueta tendrá asociado un subconjunto difuso. Al resultar las palabras menos precisas que los números, el concepto de variable lingüística es una propuesta adecuada para caracterizar aquellos fenómenos que no son adecuados para poder ser evaluados mediante valores numéricos.

Una variable lingüística se caracteriza por un quintuplo:

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

Donde:

- X es el nombre de la variable
- $T(X)$ es el término conjunto de X , es decir la colección de sus valores lingüísticos.
- U es el universo de discusión de la variable
- G es la regla sintáctica para la generación de los elementos de $T(X)$

- M es la regla semántica que asocia a cada elemento de $T(X)$ su significado. Para cada valor $L \in T(X)$, $M(L)$ será un subconjunto difuso de U .

El número de etiquetas o términos lingüísticos que definen la variable lingüística no debe ser muy elevado (normalmente inferior a 7).

El enfoque más utilizado para definir la semántica del conjunto de etiquetas lingüísticas es el basado en funciones de pertenencia. Para ello, normalmente se utilizan números difusos en el intervalo $[0,10]$ donde cada número difuso es descrito por una función de pertenencia. Tal y como se ha comentado con anterioridad, existen distintos tipos de funciones de pertenencia (trapezoidales, triangulares, etc.). A modo de ejemplo se representa en la fig. 4.9. como se describirían las etiquetas lingüísticas que evalúan la altura de una persona usando una función de pertenencia triangular:

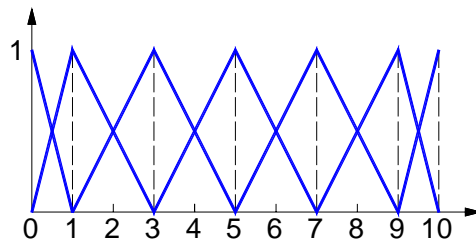


Fig.4.9.-Números difusos con función de pertenencia triangular

La definición semántica de la variable lingüística “altura” observada en la figura anterior se representa mediante las siguientes etiquetas:

$$T(\text{altura})=\{\text{Muy bajo, bajo, medio bajo, mediano, medio alto, alto, muy alto}\}$$

Resultando:

- Muy Bajo: (0,0,1)
- Bajo: (0,1,3)
- Medio bajo: (1,3,5)
- Mediano: (3,5,7)
- Medio alto: (5,7,9)
- Alto: (7,9,10)
- Muy alto: (9,10,10)



En la presente Tesis se trabajará con variables lingüísticas usando funciones de pertenencia triangulares mediante el proceso de ordenación de García-Cascales y Lamata descrito con anterioridad. Dichas variables serán utilizadas en métodos de decisión multicriterio los cuales se describirán en el próximo capítulo.

4.3. La toma de decisiones y Soft Computing en EERR

En proyectos de instalaciones de energías renovables, como en cualquier otro proyecto de ingeniería, la *toma de decisión* es una actividad intelectual que resulta necesario e imprescindible afrontar, para ello se deben construir, desarrollar y propagar metodologías adecuadas en el campo científico en el que surge la cuestión que se ha de resolver (San Cristóbal, J.R., 2011).

A continuación se procederá a repasar la bibliografía que ha proporcionado numerosos ejemplos de aplicación de metodologías de tomas de decisiones en la investigación de fuentes de energía con origen renovable.

En la década de los 90, coincidente con el impulso a la investigación en el campo de las EERR se comenzaron a estudiar y analizar diversas metodologías de ayuda a la decisión en el ámbito de las EERR. Huang et al (1995) empleó diversos métodos de decisión multicriterio (ELECTRE, AHP, TOPSIS, etc.) para llevar a cabo estrategias de planificación energética. En 1997, Georgopoulou et al (1997) estudió las ventajas e inconvenientes de la implantación de energías renovables en las islas Griegas aplicando el método ELECTRE III.

A comienzos del siglo XXI los estudios en el ámbito de las EERR se fueron extendiendo a consecuencia de las ventajas (tanto económicas como medio ambientales) que ofrecían la implantación de este tipo de instalaciones. Haralambopoulos y Polatidis (2003) aplicaron el método PROMETHEE II para investigar y evaluar la explotación de fuentes de energía geotérmica en la isla de Chios (Grecia). En el año 2004, Pohekar y Ramachandran aplicaron métodos de decisión multicriterio con el objetivo de llevar a cabo una planificación energética. Recientemente, Cavallaro (2009) aplicó el método PROMETHEE para evaluar diferentes tecnologías de concentradores solares térmicos



en el campo de la energía solar térmica de alta temperatura. Amy et al (2009) elaboró una nueva metodología multicriterio basada en el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para seleccionar posibles ubicaciones de parques eólicos en China. Al año siguiente, Cavallaro (2010a) empleó una aproximación del método TOPSIS difuso para almacenar la energía térmica en los sistemas de concentración solar, también evaluó los procesos de producción de células solares fotovoltaicas de capa delgada usando el método ELECTRE III Cavallaro (2010b). Ese mismo año Eunnyeong et al utilizaron la metodología fuzzy AHP para evaluar un programa de energía renovable.

A nivel de la península Ibérica, y más concretamente en el sur de España también se han llevado a cabo estudios relacionados con EERR, por ejemplo, Terrados et al (2009) desarrolló una combinación de metodologías multicriterio para planificar instalaciones de EERR en Andalucía.

Los procesos de toma de decisiones y la Soft Computing en el campo de las EERR ofrecen la posibilidad de combinarlos con herramientas o aplicaciones informáticas que mejoran su eficacia como por ejemplo los SIG. El éxito de la combinación de los SIG y los sistemas de ayuda a la decisión se debe a que se trata de herramientas perfectamente complementarias. Los SIG ofrecen la posibilidad al decisor o grupo decisor de efectuar el análisis, gestión, almacenamiento y visualización de cualquier información geoespacial. Partiendo de tales funciones los sistemas de ayuda a la decisión facilitan una serie de técnicas y procedimientos que permiten estructurar los problemas de decisión y evaluar las alternativas objeto de estudio (Malczewski, 1999)

Desde que se dieron a conocer, la combinación de SIG con los MCDM ha sido utilizada en números estudios de planificación territorial tales como planeamientos urbanísticos, infraestructuras urbanas, etc. (Joerin et al, 2001; Chang, N.B. et al, 2008; Sadeghi-Niaraki et al, 2011; Coutinho-Rodriguez et al, 2011).

Por tanto, los SIG son habitualmente usados en diversas disciplinas como investigaciones científicas en su más amplio concepto, cartografía, arqueología navegación, logística, planeamiento urbanístico, etc.



Conforme se han ido desarrollando los SIG, han aumentado sus campos de aplicación, entre ellos las energías renovables (Voivontas et al, 1998; Baban y Parry, 2001; Amador y Domínguez, 2005) obteniéndose en la actualidad, numerosos estudios en aplicaciones de índole energético; en el estado de Georgia (USA), Defne et al (2011) evaluaron la posibilidad de instalar plantas de energía mareomotriz mediante la combinación de SIG y evaluación multicriterio. En Oman, Charabi y Gastli (2011) estudiaron la idoneidad de instalar plantas de energía solar fotovoltaica mediante la mezcla de SIG y metodología multicriterio difusa (método OWA) para determinar el peso de los criterios.

En el continente europeo también se han comenzado a realizar estudios energéticos, en la región de Tuscany (Italy), Mari et al (2011) utilizaron SIG como sistema de ayuda a la decisión enlazándolo con una web interactiva para planificar la instalación de parques eólicos.

En la provincia de Granada, en el sur de España, Arán-Carrión et al (2008) llevaron a cabo un estudio (combinando GIS con AHP), cuyo objetivo era obtener la mejor localización de plantas solares fotovoltaicas conectadas a la red de distribución.

Aunque en este apartado se han indicado algunos estudios concretos, a consecuencia de la multitud de aplicaciones de la tomas de decisiones y el Soft Computing en el campo de las EERR y de los SIG, se muestra en la tabla 4.1. una clasificación cronológica de los estudios más relevantes llevados a cabo hasta la fecha en función de sus autores, tipo de MCDM, Soft Computing y tecnología renovable analizada (energía solar fotovoltaica: ESF, energía eólica: EO, energía solar térmica: EST, energía hidráulica: EH, energía geotérmica: EG, energía mareomotriz o de los mares y océanos: EM, energía de células de combustible: ECC y energía del biogás y la biomasa: EB).

<i>MCDM o Soft Computing</i>	<i>Tipo de EERR</i>								<i>Año</i>	<i>Autores</i>
	<i>ESF</i>	<i>EST</i>	<i>EO</i>	<i>EH</i>	<i>EM</i>	<i>EB</i>	<i>EG</i>	<i>ECC</i>		
MCDM (MAUT)	X	X							1981	Golabi, K., Kirkwood, C.W. y Sicherman, A.
MCDM (PROMETHEE)				X					1987	Mladineo, N., Margeta, J., Brans, J.P. y Mareschal, B.
MCDM (MAUT)	X	X							1990	Jones, M., Hope, C. y Hughes, R.
Lógica difusa			X						1991	Machias, A.V. y Skikos, G.D.
Lógica difusa			X						1992	Skikos, G.D. y Machias, A.V.
MCDM (AHP)		X							1997	Mohsen, M.S, Akash, B.A.
MCDM (ELECTRE-III) y lógica difusa	X		X	X		X			1998	Beccali, M., Cellura, M., y Ardente, D.
<i>Lógica difusa</i>	<i>X</i>		<i>X</i>						<i>1998</i>	<i>Monteiro, C., Saraiva, J.B. y Miranda, V.</i>
MCDM (PROMETHEE)							X		1999	Goumas, M.G., Lygerou, V.A. y Papayannakis, L.E.
MCDM (PROMETHEE) y lógica difusa							X		2000	Goumas, M.G., y Lygerou, V.A.
Lógica difusa						X			2002	Jurado, F., Ortega, M. y Cano, A.
MCDM (ELECTRE-III)	X		X	X		X			2003	Beccali, M., Cellura, M., y Mistretta, M.
MCDM (AHP)			X						2004	Aras, H., Erdogmus, S. y Koc, E.
MCDM (PROMETHEE)		X							2004	Pohekar, S.D. y Ramachandran, M.



<i>MCDM o Soft Computing</i>	<i>Tipo de EERR</i>								<i>Año</i>	<i>Autores</i>
	<i>ESF</i>	<i>EST</i>	<i>EO</i>	<i>EH</i>	<i>EM</i>	<i>EB</i>	<i>EG</i>	<i>ECC</i>		
Lógica difusa		X						X	2004	Sözen, A., Kurt, M., Akçayol, M.A. y Özalp, M.
Lógica difusa								X	2006	Bilodeau, A. y Agbossou, K.
Lógica difusa	X	X	X						2006	Kaminaris, S.D., Tsoutsos, T.D., Agoris, D. y Machias, A.V.
Lógica difusa			X						2007	Monfared, M., Nikraves, S.K.Y. y Rastegar, H.
Lógica difusa	X								2008	Altas, I.H. y Sharaf, A.M.
MCDM (AHP, TOPSIS, ELECTRE, PROMETHEE, etc.) y Lógica difusa								X	2008	Jiang-Jiang, W., You-Yin, J., Chun-Fa Z., Guo-Hua S. y Xu-Tao, Z.
Lógica difusa	X								2008	Paulescu, M., Gravila, P. y Tulcan-Paulescu, E.
(*) <i>MCDM (AHP)</i>			X						2008	<i>Ramírez-Rosado, I.J., García-Garrido, E.G., Fernández-Jiménez, L.A., Zorzano-Santamaría, P.J., Monteiro, C. y Miranda, V.</i>
Lógica difusa								X	2009	Agbossou, K., Bilodeau, A. y Doumbia, M.L.
Lógica difusa	X								2009	Badra, O., Abdulhadi, E., y Mamlock, R.
Lógica difusa			X						2009	Galdi, V., Piccolo, A. y Siano, P.
AHP difuso (combinación de MCDM y lógica difusa)	X		X	X		X	X		2009	Kahraman, C., Kaya, I. y Cebi, S.



<i>MCDM o Soft Computing</i>	<i>Tipo de EERR</i>								<i>Año</i>	<i>Autores</i>
	<i>ESF</i>	<i>EST</i>	<i>EO</i>	<i>EH</i>	<i>EM</i>	<i>EB</i>	<i>EG</i>	<i>ECC</i>		
MCDM (AHP)			X						2009	Lee, A.H.I., Chen, H.H. y Kang, H.Y.
(* <i>Lógica difusa</i>)						X			2009	<i>Nobre, R.C.M., y Nobre, M.M.M.</i>
(* <i>MCDM (OWA)</i>)			X						2010	<i>Aydin, N.Y., Kentel, E. y Duzgun, S.</i>
MCDM (Teoría de Diseño Axiomático) y Lógica difusa	X								2010	Boran, F.E., Menlik, T. y Boran, K.
AHP difuso (Combinación de MCDM y lógica difusa)	X		X						2010	Chen, H.H., Kang, H.Y. y Lee, A.H.I.
Lógica difusa	X		X	X		X	X		2010	Daim, T.U., Kayakutlu, G. y Cowan, K.
MCDM (TOPSIS con variables lingüísticas)	X	X	X	X		X			2010	Doukas, H., Karakosta, C. y Psarras, J.
(* <i>MCDM (AHP-OWA) y lógica difusa</i>)	X								2010	<i>Gastli, A. y Charabi, Y.</i>
Lógica difusa			X						2010	Hong, Y.Y., Chang, H.L. y Chiu, C.S.
(* <i>MCDM específico</i>)	X		X						2010	<i>Janke, J.R.</i>
MCDM (VIKOR-AHP) y lógica difusa	X		X	X		X	X		2010	Kaya, T. y Kahraman, C.
Lógica difusa								X	2010	Niknam, T., Meymand, H.Z. y Nayeripour, M.
AHP difuso (Combinación de MCDM y lógica difusa)	X	X	X	X	X	X	X		2010	Shen, Y.C., Lin, G.T.R., Li, K.P., Yuan, B.J.C.



<i>MCDM o Soft Computing</i>	<i>Tipo de EERR</i>								<i>Año</i>	<i>Autores</i>
	<i>ESF</i>	<i>EST</i>	<i>EO</i>	<i>EH</i>	<i>EM</i>	<i>EB</i>	<i>EG</i>	<i>ECC</i>		
MCDM (AHP) y lógica difusa		X	X						2010	Talinli, I., Topuz, E. y Akbay, M.U.
Lógica difusa			X						2010	Zhu, J. y Cheung, K.
Proceso difuso analítico en red	X								2011	Amy H.I.L, Hsing, H.C. y He-Yau, K.
MCDM (AHP) y Lógica difusa				X				X	2011	Barin, A., Canha, L.N., Abaide, A.R., Magnago K.F. y Machado, R.Q.
MCDM (ELECTRE-III)	X	X					X		2011	Catalina, T., Virgone, J. y Blanco, E.
Lógica difusa (programación lineal difusa multi-objetivo)	X								2011	Sengupta, P.P.
Lógica difusa			X						2011	González de la Rosa, J.J., Pérez, A.A., Palomares Salas, J.C., Ramiro Leo, J.G. y Moreno Muñoz, A.
(*) <i>MCDM específico</i>	X	X							2011	<i>Jo, J.H. y Otanicar, T.P.</i>
ANP difuso (Combinación de MCDM y lógica difusa)			X						2011	Kang,H.Y., Hung,M.C., Pearn, W.L., Lee A.H.I. y Kang, M.S.
MCDM (AHP y TOPSIS) y lógica difusa	X								2011	García-Cascales, M.S., Lamata, M.T. y Sánchez-Lozano, J.M.
AHP difuso (Combinación de MCDM y lógica difusa)								X	2011	Lee, S.K., Mogi, G., Li, Z., Hui, K.S., Lee, S.K., Hui, K.N., Park, S.Y., Ha, Y.J, Kim, J.W.
Lógica difusa					X				2011	Özger, M.



<i>MCDM o Soft Computing</i>	<i>Tipo de EERR</i>								<i>Año</i>	<i>Autores</i>
	<i>ESF</i>	<i>EST</i>	<i>EO</i>	<i>EH</i>	<i>EM</i>	<i>EB</i>	<i>EG</i>	<i>ECC</i>		
MCDM (VIKOR)		X	X	X		X			2011	San Cristóbal, J.R.
Optimización multi-objetivo difusa	X		X					X	2012	Abedi, S., Alimardani, A., Gharehpetian, G.B., Riahy, G.H. y Hosseinian, S.H.
(* MCDM (AHP-OWA)			X						2012	Al-Yahyai, S., Charabi, Y., Gastli, A. y Al-Badi, A.
TOPSIS difuso (Combinación de MCDM y lógica difusa)	X		X	X			X		2012	Boran, F.E., Boran, K. y Menlik, T.
Lógica difusa			X						2012	Chowdhury, M.A., Hosseinzadeh, N. y Shen, W.X.
Lógica difusa	X		X					X	2012	Kyriakarakos, G., Dounis, A.I., Arvanitis, K.G. y Papadakis, G.
AHP difuso (Combinación de MCDM y lógica difusa)	X		X						2012	Liua, G., Rasulb, M.G., Amanullahc, M.T.O. y Khan, M.M.K.
Lógica difusa	X								2012	Zhai, P. y Williams, E.D.
(* MCDM (AHP)							X		2012	Zubaryeva, A., Zaccarelli, N., Giudice, C.D. y Zurlini, G.

(* Artículos realizados que incluyen GIS

Tabla 4.1.-Aplicaciones de MCDM, Soft Computing, EERR y GIS en la literatura

4.4. Referencias bibliográficas del Capítulo IV

- Abedi, S., Alimardani, A., Gharehpetian, G.B., Riahy, G.H. y Hosseinian, S.H. (2012). A comprehensive method for optimal power management and design of hybrid RES-based autonomous energy systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, pp. 1577–1587
- Agbossou, K., Bilodeau, A. y Doumbia, M.L., (2009). Development of a Control Method for a Renewable Energy system with Fuel Cell. *IEEE AFRICON 2009*, 978-1-4244-3919-5/09, Nairobi, Kenya.
- Altas, I.H. y Sharaf, A.M., (2008). A novel maximum power fuzzy logic controller for photovoltaic solar energy systems. *Renewable Energy*, 33, pp. 388–399
- Al-Yahyai, S., Charabi, Y., Gastli, A. y Al-Badi, A., (2012). Wind farm land suitability indexing using multi-criteria analysis. *Renewable Energy*, 44, pp. 80-87.
- Amador, J. y Domínguez, J., (2005). Application of geographical information systems to rural electrification with renewable energy sources, *Renewable Energy*. 30. pp. 1897–1912.
- Amy H.I.L, Hsing, H.C. y He-Yau, K., (2011). A model to analyze strategic products for photovoltaic silicon thin-film solar cell power industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, pp. 1271–1283.
- Amy H.I.L, Hsing, H.C. y He-Yau, K., (2009). Multi-criteria decision making on strategic selection of wind farms. *Renewable energy*, 34, pp. 120-126.
- Arán-Carrión, J., Espín-Estrella, A., Aznar-Dols, F., Zamorano-Toro, M., Rodríguez, M., y Ramos-Ridao, A., (2008). Environmental decision-support systems for evaluating the carrying capacity of land areas: Optimal site selection for grid-connected photovoltaic power plants. *Renewable and sustainable energy reviews*. 12. pp. 2358-2380.
- Aras, H., Erdogmus, S. y Koc, E., (2004). Multi-criteria selection for a wind observation station location using Analytic Hierarchy Process. *Renewable Energy*, 23, pp. 1383-1392.
- Aydin, N.Y., Kentel, E. y Duzgun, S., (2010). GIS-based environmental assessment of wind energy systems for spatial planning: A case study from Western Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, pp. 364–373.



- Baban, M.J.S., y Parry, T., (2001), Developing and applying a GIS-assisted approach to locating wind farms in the UK, *Renewable Energy*, 24, pp. 59–71.
- Badra, O., Abdulhadi, E., y Mamlock, R., (2009), Evaluation of solar electric power technologies in Jordan using fuzzy logic. *Proceedings of the 2nd International Conference on Energy Sustainability, ES 2008*, 2, pp. 443-448.
- Barin, A., Canha, L.N., Abaide, A.R., Magnago K.F. y Machado, R.Q., (2011). Storage energy management with power quality concerns the analytic hierarchy process and the fuzzy logic. *IEEE 2009*, 978-1-4244-3370-4/09. COBEP 2009, 5347765, pp. 225-231.
- Beccali, M., Cellura, M., y Ardente, D., (1998). Decision making in energy planning: The ELECTRE multicriteria analysis approach compared to a fuzzy-sets methodology. *Energy Conversion and Management*, 39 (16-18), pp. 1869-1881
- Beccali, M., Cellura, M., y Mistretta, M., (2003). Decision-making in energy planning. Application of the Electre method at regional level for the diffusion of renewable energy technology. *Renewable Energy*, 28, pp.2063–2087.
- Bilodeau, A. y Agbossou, K., (2006). Control analysis of renewable energy system with hydrogen storage for residential applications. *Journal of Power Sources*, 162, pp. 757–764.
- Boran, F.E., Menlik, T. y Boran, K., (2010). Multi-criteria Axiomatic Design Approach to Evaluate Sites for Grid-connected Photovoltaic Power Plants: A Case Study in Turkey. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 5, 3, pp. 290-300.
- Boran, F.E., Boran, K. y Menlik, T., (2012). The Evaluation of Renewable Energy Technologies for Electricity Generation in Turkey Using Intuitionistic Fuzzy TOPSIS. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 7, 1, pp. 81-90.
- Catalina, T., Virgone, J. y Blanco, E., (2011). Multi-source energy systems analysis using a multi-criteria decision aid methodology. *Renewable Energy*, 36, pp. 2245-2252.
- Cavallaro, F. (2009). Multi-criteria decision aid to assess concentrated solar thermal technologies. *Renewable Energy*, 34, pp. 1678-1685.
- Cavallaro, F. (2010a). Fuzzy TOPSIS approach for assessing thermal-energy storage in concentrated solar power (CSP) systems. *Applied Energy*, 87, pp. 496-503.



- Cavallaro, F. (2010b). A comparative assessment for thin-film photovoltaic production processes using the ELECTRE III method. *Energy Policy*, 38, pp. 463-474.
- Chang, N.B., Parvathinathan, G. y Breeden, J.B., (2008). Combining GIS with fuzzy multicriteria decision-making for landfill siting in a fast-growing urban region. *Journal of Environmental Management*. 87. pp. 139-153.
- Charabi, Y. y Gastli, A., (2011). PV site suitability analysis using GIS-based spatial fuzzy multi-criteria evaluation. *Renewable Energy*. 36. pp. 2554-2561.
- Chen, H.H., Kang, H.Y. y Lee, A.H.I., (2010). Strategic selection of suitable projects for hybrid solar-wind power generation systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, pp. 413–421.
- Chowdhury, M.A., Hosseinzadeh, N. y Shen, W.X., (2012). Smoothing wind power fluctuations by fuzzy logic pitch angle controller. *Renewable Energy*, 38, pp. 224-233.
- Coutinho-Rodriguez, J., Simao, A. y Henggeler-Antunez, C., (2011). A GIS-based multicriteria spatial decision support system for planning urban infrastructures, *Decision Support Systems*. 51. pp. 720-726.
- Daim, T.U., Kayakutlu, G. y Cowan, K., (2010). Developing Oregon's renewable energy portfolio using fuzzy goal programming model. *Computers & Industrial Engineering*, 59, pp. 786–793.
- Defne, Z. Haas, K.A. y Fritz, H.M., (2011). GIS-based multi-criteria assessment of tidal stream power potential: A case study for Georgia, USA, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15. pp. 2310-2321.
- Doukas, H., Karakosta, C. y Psarras, J., (2010). Computing with words to assess the sustainability of renewable energy options. *Expert Systems with Applications*, 37, pp 5491–5497.
- Eunnyeong, H., Jinsoo, K. y Kyung-Jin, B., (2010). Analysis of the assessment factors for renewable energy dissemination program evaluation using fuzzy AHP, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, pp. 2214-2220.
- Galdi, V., Piccolo, A. y Siano, P., (2009). Exploiting maximum energy from variable speed wind power generation systems by using an adaptive Takagi–Sugeno–Kang fuzzy model. *Energy Conversion and Management*, 50, pp. 413–421.



- García-Cascales, M.S. y Lamata, M.T., (2007). A modification of the index of Liou and Wang for ranking fuzzy number," *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 15, 4, pp. 411-424.
- García Cascales, M.S., (2009): *Methods for comparison of alternatives by a system to aid decision (SAD) and "Soft Computing"*; Universidad Politécnica de Cartagena.
- García-Cascales, M.S., Lamata, M.T. y Sánchez-Lozano, J.M., (2012). Evaluation of photovoltaic cells in a multi-criteria decision making process, *Annals of Operations Research*, 199, pp. 373-391.
- Gastli, A. y Charabi, Y., (2010). Siting of Large PV Farms in Al-Batinah Region of Oman. *2010 IEEE International Energy Conference*. 978-1-4244-9380-7/10.
- Golabi, K., Kirkwood, C.W. y Sicherman, A., (1981). Selecting a portfolio of solar energy projects using multiattribute preference theory. *Management Science*, 22, 2, pp. 174-189
- Georgopoulou E., Lalas, D., y Papagiannakis, L., (1997). A multicriteria decision aid approach for energy planning problems: The case of renewable energy option. *European Journal of Operational Research*. 103, pp. 38-54.
- González de la Rosa, J.J., Pérez, A.A., Palomares Salas, J.C., Ramiro Leo, J.G. y Moreno Muñoz, A., (2011). A novel inference method for local wind conditions using genetic fuzzy systems. *Renewable Energy*, 36, pp. 1747-1753.
- Goumas, M.G., Lygerou, V.A. y Papayannakis, L.E., (1999). Computational methods for planning and evaluating geothermal energy projects. *Energy Policy*, 27, pp. 147-54.
- Goumas, M.G., y Lygerou, V.A., (2000). An extension of the PROMETHEE method for decision-making in fuzzy environment: ranking of alternative energy exploitation projects. *European Journal of Operational Research*, 123, pp. 606-613.
- Haralambopoulos, D.A. y Polatidis, H., (2003). Renewable energy projects: structuring a multi-criteria group decision-making framework. *Renewable energy*, 28, pp. 961-973.
- Hong, Y.Y., Chang, H.L. y Chiu, C.S., (2010). Hour-ahead wind power and speed forecasting using simultaneous perturbation stochastic approximation (SPSA) algorithm and neural network with fuzzy inputs. *Energy*, 35, pp 3870-3876.



- Huang, J.P., Poh, K.L., y Ang, B.W., (1995). Decision analysis in energy and environmental modelling, *Energy*, 20 (9), pp. 843-855.
- Janke, J.R., (2010). Multicriteria GIS modeling of wind and solar farms in Colorado. *Renewable Energy*, 35, pp. 2228-2234
- Jiang-Jiang, W., You-Yin, J., Chun-Fa Z., Guo-Hua S. y Xu-Tao, Z., (2008), A fuzzy multi-criteria decision-making model for trigeneration system. *Energy Policy*, 36, pp. 3823–3832.
- Jo, J.H. y Otanicar, T.P., (2011). A hierarchical methodology for the mesoscale assessment of building integrated roof solar energy systems. *Renewable Energy*, 36, pp. 2992-3000.
- Joerin, F., Thériault, M. y Musy, A., (2001). Using GIS and outranking multicriteria analysis for land-use suitability assessment. *International Journal of Geographical Information Science*. 15. pp. 153-174.
- Jones, M., Hope, C. y Hughes, R., (1990). A multi-attribute value model for the study of UK energy policy. *Journal Operation Research Soc.*, 41, 10, pp. 919-929.
- Jurado, F., Ortega, M. y Cano, A., (2002). Effect of the Use of a Gas Motor in a Biomass-Based Electric Power Plant, *Energy Sources*, 24:8, pp. 743-751.
- Kahraman, C., Kaya, I. y Cebi, S., (2009). A comparative analysis for multiattribute selection among renewable energy alternatives using fuzzy axiomatic design and fuzzy analytic hierarchy process. *Energy*, 34, pp. 1603–1616.
- Kaminaris, S.D., Tsoutsos, T.D., Agoris, D. y Machias, A.V., (2006). Assessing renewables-to-electricity systems: a fuzzy expert system model. *Energy Policy*, 34, pp. 1357–1366.
- Kang, H.Y., Hung, M.C., Pearn, W.L., Lee A.H.I. y Kang, M.S., (2011). An Integrated Multi-Criteria Decision Making Model for Evaluating Wind Farm Performance. *Energies*, 4, pp. 2002-2026; DOI:10.3390/en4112002
- Kaya, T. y Kahraman, C., (2010). Multicriteria renewable energy planning using an integrated fuzzy VIKOR & AHP methodology: The case of Istanbul. *Energy*, 35, pp. 2517-2527.
- Keeney, R. y Raiffa, H., (1976). *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Values Tradeoffs*, Wiley, New York ed.



- Klir, G.J. y Yuan, B. (1995). *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic*, Prentice Hall PTR, New Jersey ed.
- Kyriakarakos, G., Dounis, A.I., Arvanitis, K.G. y Papadakis, G., (2012). A fuzzy logic energy management system for polygeneration microgrids. *Renewable Energy*, 41, pp. 315-327.
- Lee, A.H.I., Chen, H.H. y Kang, H.Y., (2009). Multi-criteria decision making on strategic selection of wind farms. *Renewable Energy*, 34, pp. 120–126.
- Lee, S.K., Mogi, G., Li, Z., Hui, K.S., Lee, S.K., Hui, K.N., Park, S.Y., Ha, Y.J, Kim, J.W, (2011). Measuring the relative efficiency of hydrogen energy technologies for implementing the hydrogen economy: An integrated fuzzy AHP/DEA approach. *International journal of hydrogen energy* 36, pp. 12655-12663.
- Liou, T.S. y Wang, M.J., (1992). Ranking fuzzy numbers with integral value, *Fuzzy Sets and Systems*, 50, pp. 247-255.
- Liua, G., Rasulb, M.G., Amanullahc, M.T.O. y Khan, M.M.K., (2012). Sustainability indicator of renewable energy system based on fuzzy multi-criteria decision making methods. *Advanced Materials Research* Vols. 361-363, pp. 1263-1273.
- Luce, R. D. y Raiffa, H., (1957). *Games and Decisions: Introduction and Critical Survey* New York. John Wiley and Sons.
- Machias, A.V. y Skikos, G.D., (1991). A Fuzzy-Based risk analysis of wind locations. *Renewable Energy*, 1, 5/6, pp. 649-654.
- Malczewski, J., (1999), *GIS and multicriteria decision analysis*. New York: J. Wiley & Sons, 392pp.
- Mari, R., Bottai, L., Bosillo, C., Calastrini, F., Gozzini, B. y Gualtieri, G., (2011). A GIS-based interactive web decision support system for planning wind farms. *Renewable Energy* ,36, 754-763.
- Mladineo, N., Margeta, J., Brans, J.P. y Mareschal, B., (1987). Multicriteria ranking of alternative locations for small scale hydro plants. *European Journal of Operational Research*, 31, pp. 215-222.
- Monfared, M., Nikraves, S.K.Y. y Rastegar, H., (2007). A Novel Fuzzy Predictor for Wind Speed. Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2007 WCECS 2007, October 24-26, ISBN:978-988-98671-6-4, San Francisco, USA



- Mohsen, M.S, Akash, B.A. (1997). Evaluation of domestic solar water heating system in Jordan using Analytical Hierarchy Process. *Energy Conversion and Management*, 38, 18, PP. 1815-1822
- Monteiro, C., Saraiva, J.B. y Miranda, V., (1998). Evaluation of electrification alternatives in developing countries- the SOLARGIS tool. Electrotechnical Conference, 1998. *MELECON 98.*, 9th Mediterranean.
- Niknam, T., Meymand, H.Z. y Nayeripour, M., (2010). A practical algorithm for optimal operation management of distribution network including fuel cell power plants. *Renewable Energy*, 35, pp. 1696–1714.
- Nobre, R.C.M., y Nobre, M.M.M., (2009). Assessing groundwater vulnerability to nitrate of biofuels production in Brazil. Proceedings of the 10th International *In Situ and On-Site Bioremediation Symposium*.
- Özger, M., (2011). Prediction of ocean wave energy from meteorological variables by fuzzy logic modeling. *Expert Systems with Applications*, 38, pp. 6269–6274.
- Paulescu, M., Gravila, P. y Tulcan-Paulescu, E., (2008). Fuzzy logic algorithms for atmospheric transmittances of use in solar energy estimation. *Energy Conversion and Management*, 49, pp. 3691–3697.
- Pohekar, S.D. y Ramachandran, M., (2004). Multi-criteria evaluation of cooking energy alternatives for promoting parabolic solar cooker in India. *Renewable Energy*, 29, 9, pp. 1449-1460.
- Pohekar, S.D. y Ramachandran, M., (2004). Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 8, pp. 365-381.
- Ramírez-Rosado, I.J., García-Garrido, E.G., Fernández-Jiménez, L.A., Zorzano-Santamaría, P.J., Monteiro, C. y Miranda, V., (2008). Promotion of new wind farms based on a decision support system. *Renewable Energy*, 33, pp. 558–566.
- Roy, B., (1968). Classement et choix en presence de points de vue multiples (la method ELECTRE), *Revue informatique et recherché opérationnelle*. 8. pp. 57-75.
- Roy, B., (1978). ELECTRE III: un algorithme de classement fondé sur une représentation floue des préférences en présense de critères multiples, *Cahiers du CERO*, 20. 1. pp. 3-24.



- Roy, B. y Bertier, P., (1971). La méthode ELECTRE II: une méthode de classement en présence de critères multiples, *SEMA (Metra International)*, 142. Paris. 25 p.
- Roy, B. y Bertier, P., (1973). La méthode ELECTRE II: une application au media-planning. Ross M. (ed.) *Operational Research 1972*. North-Holland Publishing Company. pp. 291-302.
- Roy, B. y Bouyssou, D. (1991). *Aide à la decision fondée sur une PAMC de type ELECTRE*. Université Paris-Dauphine. Document du LAMSADE, 69. 118 p.
- Roy, B. y Bouyssou, D., (1993). *Aide multicritère à la décision: méthodes et cas*. Economica. Paris.
- Roy, B. y Hugonnard, J.C., (1982a). Classement des prolongements de lignes de metro en banlieue parisienn (presentation d'une method multicritère originale), *Cahier du CERO*, 24. 2-3-4. pp. 153-171.
- Roy, B. y Hugonnard, J.C., (1982b). Le plan d'extension du metro en banlieue parisienn, un cas type de l'analyse multicritère, *Les Cahiers scientifiques de la revue Transports*. 6, pp. 77-108.
- Roy, B. y Skalka, J.M., (1985). *ELECTRE IS: aspects méthodologiques et guide d'utilisation*. Université Paris-Dauphine. Document du LAMSADE, 30. 125 p.
- San Cristóbal, J.R., (2011). Multi-criteria decision-making in the selection of a renewable energy project in Spain: The Vikor method. *Renewable Energy*, 36, pp. 498-502.
- Saaty, T.L., (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York.
- Saaty, T., (2005). *Theory and Applications of the Analytic Network Process*. Pittsburgh: RSW Publications.
- Sadeghi-Niaraki, A., Varshosaz, M., Kim, K. y Jung, J.J., (2011). Real world representation of a road network for route planning in GIS. *Expert Systems with Applications*. 38. pp. 11999-12008.
- San Cristobal, J.R., (2011). A multi criteria data envelopment analysis model to evaluate the efficiency of the Renewable Energy technologies. *Renewable Energy*, 36, pp. 2742-2746.
- Sengupta, P.P., (2011). Energy Management In The Perspective Of Global Environmental Crisis: An Evidence From India. *GHOSH-Management and Service Science (MASS)*. 2011 IEEE, 978-1-4244-6581-1/11.



- Shen, Y.C., Lin, G.T.R., Li, K.P., Yuan, B.J.C., (2010). An assessment of exploiting renewable energy sources with concerns of policy and technology. *Energy Policy*, 38, pp. 4604–4616.
- Skikos, G.D. y Machias, A.V., (1992). Fuzzy multi criteria decision making for evaluation of wind sites. *Wind Energy*, 6, 4, pp. 213-228.
- Simon, H., (1960). *The New Science of Management Decision*. New York: Harper and Row.
- Sözen, A., Kurt, M., Akçayol, M.A. y Özalp, M., (2004). Performance prediction of a solar driven ejector-absorption cycle using fuzzy logic. *Renewable Energy*, 29, pp. 53–71.
- Talinli, I., Topuz, E. y Akbay, M.U., (2010). Comparative analysis for energy production processes (EPPs): Sustainable energy futures for Turkey. *Energy Policy*, 38, pp. 4479–4488.
- Terrados, J., Almonacid, G. y Pérez-Higueras, P., (2009). Proposal for a combined methodology for renewable energy planning. Application to a Spanish region. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 13, pp. 2022-2030.
- Triantaphyllou, E., (2000). *Multi-criteria Decision Making Methods: A comparative study*, Kluwer Academic Publishers.
- Verdegay, J.L., Yager, R.R. y Bonissone, P.P. (2008). On heuristics as a fundamental constituent of soft computing. *Fuzzy Sets and Systems*, 159, 7, pp. 846-855.
- Vinke, J. P. y Brans, J. P., (1985). A preference ranking organization method - (the PROMETHEE method for multiple criteria decision-making), *Management science*, 31, 6, pp. 647-656.
- Voivontas, D., Assimacopoulos, D. y Mourelatos, A., (1998), Evaluation of renewable energy potential using a GIS decision support system. *Renewable Energy*. 13. 3. pp. 333-344.
- Von Neumann, J. y Morgenstern, O., (1944). *Theory of games and economic behaviour*. Princeton University Press.
- Yu, W., (1992a). *Aide multicritère à la decision dans le cadre de la problématique du tri concepts, méthodes et applications*, These de doctorat, UER Sciences de l'organisation, Université Paris-Dauphine. 201 p.
- Yu, W., (1992b). *ELECTRE TRI. Aspects méthodologiques et manuel d'utilisation*. Université Paris-Dauphine. Document du LAMSADE, 74. 80 p.



- Zadeh, L.A., (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning: Part 1. *Information sciences*, 8. 3. pp. 199-249.
- Zadeh, L.A. (1994). Soft computing and fuzzy logic, *IEEE Software*, 11, 6, pp. 48-56.
- Zadeh, L.A. (2001). Applied Soft Computing; Foreword, *Applied soft computing*, 1, 1, p. 1.
- Zhai, P. y Williams, E.D., (2012). Analyzing consumer acceptance of photovoltaics (PV) using fuzzy logic model. *Renewable Energy*, 41, pp. 350-357.
- Zhu, J. y Cheung, K., (2010). Selection of Wind Farm Location Based on Fuzzy Set Theory. *IEEE PES General Meeting, PES 2010*, 978-1-4244-6551-4/10. n° 5589449.
- Zubaryeva, A., Zaccarelli, N., Giudice, C.D. y Zurlini, G., (2012). Spatially explicit assessment of local biomass availability for distributed biogas production via anaerobic co-digestion e Mediterranean case study. *Renewable Energy*, 39, pp. 261-270.



CAPÍTULO V

EVALUACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE ALTERNATIVAS





“Son vanas y están plagadas de errores las ciencias que no han nacido del experimento, madre de toda certidumbre”.

Leonardo Da Vinci

CAPÍTULO V

EVALUACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE ALTERNATIVAS

5.1. Introducción

En este capítulo se desarrollarán las distintas metodologías de decisión multicriterio que serán utilizadas en la presente Tesis Doctoral.

La evaluación y clasificación de las alternativas se llevará a cabo mediante el método de decisión multicriterio denominado TOPSIS difuso ya que, algunos de los criterios que influyen en la toma de decisión son de naturaleza cualitativa y la representación de valores difusos definidos a través de etiquetas lingüísticas favorecen al decisor en procesos de toma de decisiones de esta índole.

No obstante, con carácter previo al desarrollo del método TOPSIS difuso será necesario obtener el peso o importancia de los criterios y, dado que tales criterios son independientes entre sí se recurrirá al empleo del método AHP para su ponderación.

Una vez desarrollado el método TOPSIS difuso en su totalidad se llevará a cabo una comparativa entre dos métodos de decisión multicriterio: el método TOPSIS y el método considerado más influyente de la escuela europea, ELECTRE-TRI. El objetivo de dicha comparativa consistirá en poder analizar ambos métodos según los resultados obtenidos con vistas a estudiar sus diferencias y observar en qué aspectos son coincidentes.

5.2. El Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

Es un método de selección de alternativas en función de una serie de criterios los cuales suelen estar en conflicto, fue propuesto por Saaty en 1980 y está basado en la idea de que un problema de toma de decisión con criterios múltiples, se puede resolver mediante la jerarquización de los problemas planteados.

La principal característica del AHP es que el problema de decisión se modeliza mediante una jerarquía en cuyo vértice superior está el principal objetivo del problema y, en la base se sitúan las posibles alternativas a evaluar, los niveles intermedios corresponden a los criterios y subcriterios en base a los cuales se toma la decisión.

En cada nivel de la jerarquía se realizan comparaciones entre pares de elementos de ese nivel, en base a la importancia o contribución de cada uno de ellos al elemento del nivel superior al que están ligados.

La información que proporciona es redundante, peculiaridad que resulta ventajosa pues permite reducir los errores y obtener mayor consistencia.

5.2.1. Pasos del método AHP

- I. Estructuración del problema como una jerarquía: La jerarquía adopta la forma indicada en la fig. 5.1:

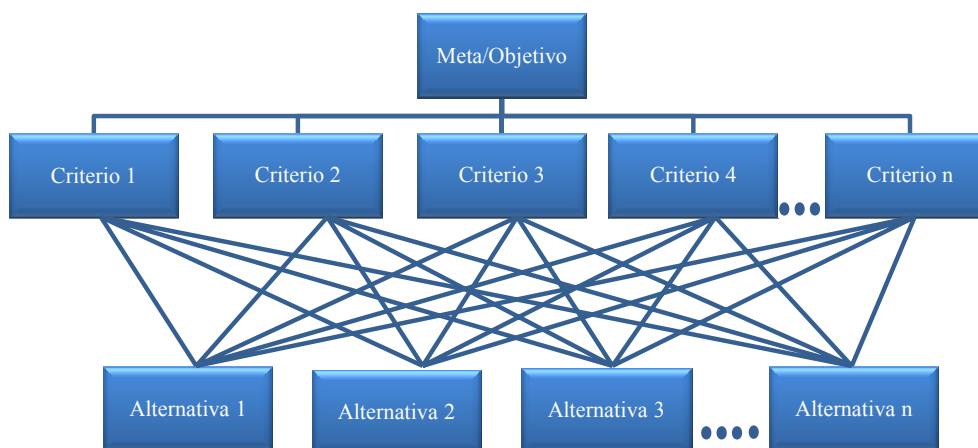


Fig.5.1.- Jerarquía proceso AHP



En el vértice superior se sitúa la meta u objetivo a alcanzar. El problema de decisión consiste en elegir la alternativa que mejor contribuye a la consecución de la meta situada en el nivel superior.

En orden descendente, el siguiente nivel estaría formado por los criterios, resulta fundamental escoger adecuadamente los criterios ya que, un planteamiento erróneo de los mismos desembocaría en resultados poco satisfactorios que, incluso podrían llegar a invalidar el proceso.

Los criterios deben ser comprensibles y medibles, es decir, el valor del atributo ha de ser el adecuado para expresar o medir el grado de cumplimiento del objetivo asociado y debe de ser posible asociarle una escala conocida.

Una vez definidos los criterios puede darse el caso de que éstos se puedan descomponer en otros subcriterios formando otro nivel descendente.

Finalmente, en el último nivel de la jerarquía se sitúan las alternativas las cuales representan el conjunto de posibles opciones definidas sobre las que la unidad decisora toma una decisión.

El método AHP pretende ser una herramienta de ayuda al decisor en el proceso de elección de la alternativa que mejor contribuye a alcanzar la meta del problema planteado.

II. Establecimiento de las prioridades entre los criterios

No todos los criterios tiene para el decisor la misma importancia, por ello, se debe encontrar un vector de prioridades o pesos de los criterios en base a la importancia que asigne el decisor a cada uno. Dichos valores pueden obtenerse mediante dos estrategias: Asignación directa y asignación indirecta



A. *Asignación directa*

El decisor tiene que realizar una valoración sobre la importancia del criterio, esta valoración puede ser cuantitativa o lo que es más natural, el decisor la expresa en términos cualitativos y, mediante el uso de una escala (previamente establecida) se obtienen los valores numéricos que corresponden con su valoración cualitativa.

Algunas de las escalas de asignación directa más comunes son las representadas en la tabla 5.1.

<i>Valoración cualitativa</i>	<i>Valoración cuantitativa</i>		
	<i>Escala Likert</i>	<i>Escala de Saaty</i>	<i>Escala difusa triangular</i>
Muy débil	1	1	(1, 1, 1)
Débil	2	3	(2, 3, 4)
Moderada	3	5	(4, 5, 6)
Fuerte	4	7	(6, 7, 8)
Muy fuerte	5	9	(8, 9, 9)

Tabla 5.1.- Propuestas de escalas de asignación directa

B. *Asignación indirecta*

Constituye una de las principales características del método AHP para establecer las prioridades de los criterios. El procedimiento consiste en hacer las $n \cdot (n-1) / 2$ comparaciones entre pares para formar la matriz W , el vector propio de dicha matriz proporcionará el vector de pesos normalizado, a continuación se describirá el proceso.

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



$$\begin{pmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix} = \mu \cdot \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

Donde:

w_j es la magnitud que se mide: pesos de los criterios

Los elementos de la matriz $W=(w_{ij})$ con $w_{ij}=w_i/w_j$ para $i,j=1,2,\dots,n$ son números positivos

La ecuación anterior se puede expresar de la forma siguiente:

$$W \cdot \bar{w} = \mu \cdot \bar{w} \quad (5.2)$$

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

$$w_i \cdot \sum_{j=1}^n \frac{1}{w_j} \quad (5.3)$$

Y la suma de los elementos de la matriz para la columna j es:

$$\frac{1}{w_j} \cdot \sum_{i=1}^n w_i = \frac{1}{w_j} \quad (5.4)$$

Por tanto si se normaliza la suma de columnas se obtiene el vector w . Como cada columna de la matriz W es múltiplo constante del vector w , dicho vector se puede encontrar mediante la normalización de cualquier columna de W , además, se dice que W es consistente porque satisface la condición $w_{ij}=w_{ik} \cdot w_{kj} \quad \forall i,j,k$.

Cuando el decisor debe establecer las prioridades mediante comparación entre pares para determinar los pesos de los criterios, construye una matriz R cuyos elementos r_{ij} son valores numéricos positivos que indican la importancia o prioridad relativa entre el criterio C_i y el criterio C_j respecto al elemento del nivel inmediatamente superior (meta



u objetivo). Para determinar esta importancia se recurre a escalas previamente establecidas, de las cuales destaca la escala fundamental propuesta por Saaty (1990), (tabla 5.2.).

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

Tabla 5.2.- Escala fundamental de comparación pareada (Saaty, T., 1990)

El decisor, haciendo uso de la escala fundamental, puede completar la matriz recíproca R que será de la forma:

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

Donde $r_{ij} \cdot r_{ji} = 1$

La consistencia de la matriz se puede determinar mediante la resolución de la siguiente expresión:

$$R \cdot \vec{w} = \lambda_{\max} \cdot \vec{w} \tag{5.5}$$



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

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (5.6)$$

El índice de consistencia aleatorio (RI) se define como el índice de consistencia aleatorio medio obtenido mediante la simulación de 100.000 matrices recíprocas generadas aleatoriamente utilizando la escala de Saaty (1/9, 1/8, ..., 1, ..., 8, 9).

Si se calcula el cociente entre el índice de consistencia (CI) y el índice de consistencia aleatorio (RI) se obtiene el denominado ratio de consistencia (CR):

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (5.7)$$

Resulta posible comparar el número de juicios con el índice de consistencia aleatorio (RI) y de esta forme mejorar la consistencia de la matriz según la tabla mostrada a continuación:

<i>n</i>	1	2	3	4	5	6	7	8
<i>RI</i>	0	0	0.525	0.882	1.115	1.252	1.341	1.404
<i>n</i>	9	10	11	12	13	14	15	16
<i>RI</i>	1.452	1.484	1.513	1.535	1.555	1.570	1.583	1.595

Tabla 5.3.- Índice de consistencia aleatorio (RI) función de la dimensión de la matriz (n)

(Alonso, J.A. y Lamata, M.T., 2006)

Si este cociente vale 0,10 ó menos, se acepta la consistencia de la matriz y por tanto el autovector de pesos se admite como válido. Para $n=3$ el umbral se fija en 0,05 y para



$n=4$ en $0,08$. Para $n \geq 5$, si CR es mayor que $0,10$ se debe estudiar el problema de nuevo y revisar los juicios emitidos.

Una vez calculado el vector de pesos o prioridades $\bar{w} = [w_1, w_2, \dots, w_n]$ (correctamente calculado λ_{max} y el vector propio \bar{Z} asociado, bien de forma aproximada), se analizan los resultados y se establece definitivamente el vector de prioridades o pesos \bar{w} .

Aunque la metodología AHP permite obtener la evaluación y análisis de las alternativas y por tanto el resultado final del problema de decisión planteado, la Tesis Doctoral estará centrada en los pasos iniciales que permitirán establecer los pesos de los criterios puesto que, el análisis y evaluación de las alternativas se desarrollará con distinta metodología.

5.2.2. Ventajas e inconvenientes del AHP

En todas las técnicas de decisión multicriterio se pueden encontrar aspectos positivos y negativos, bien desde un punto de vista teórico o bien desde la práctica. Entre las principales ventajas del método AHP destacan las siguientes:

- Teoría: Ofrece una axiomática teórica.
- Unidad: Proporciona un modelo único fácilmente comprensible y flexible.
- Complejidad: Integra enfoques deductivos y de sistemas para resolver problemas complejos.
- Estructura jerárquica: Refleja la tendencia natural de la mente a clasificar elementos en diferentes niveles y a agrupar elementos similares en cada nivel
- Compensaciones: Toma en consideración las prioridades relativas de los factores en un sistema y permite seleccionar la mejor alternativa
- Repetición del proceso: Permite concretar la definición del problema y repetir el proceso.



No obstante, el método AHP también presenta una serie de inconvenientes entre los que destacan:

- El número de combinaciones $n \cdot (n-1)/2$ requeridas es función de n , por ello el número de preguntas al experto puede resultar excesivo (Si $n=9 \Rightarrow 36$ preguntas).
- La escala fundamental empleada para expresar los juicios.
- La interpretación de las prioridades obtenidas.
- Puede generar situaciones de inconsistencia (Bana y Vansnick, 2008).
- Introducir una nueva alternativa puede acarrear la variación de la estructura de preferencias del decisor (rango reverso).

5.2.3. AHP en grupo.

La metodología expuesta constituye el procedimiento básico del método AHP, sin embargo resulta necesario considerar una situación que suele ocurrir en muchas decisiones.

Esta situación es la toma de decisión en grupo, como es el caso del presente estudio. En tal caso la unidad decisora está formada por más de una entidad, es decir es un conjunto de individuos interesados en el proceso de decisión de forma que se debe adoptar una única solución que refleje globalmente las opiniones o intereses del grupo.

La forma de integrar las valoraciones de cada experto para obtener la solución única se puede realizar mediante diferentes técnicas. Se ha comprobado que realizar la media geométrica de las valoraciones es un procedimiento aceptable, sencillo y rápido. Además la media geométrica cumple las condiciones de simetría (la valoración global no varía si dos valoraciones individuales se intercambian), de acuerdo (si todos los individuos están de acuerdo, la opinión global también) y de homogeneidad lineal (si cada miembro del grupo multiplica su valoración por una constante, la preferencia del grupo también se multiplica por dicha constante).



Para el caso particular de la metodología AHP, la principal característica de la media geométrica es que permite mantener la reciprocidad de la matriz de Saaty ya que, en caso de utilizar otro tipo de operación, no se podría aplicar los procedimientos definidos anteriormente para obtener el autovalor y autovector.

Por tanto, cuando se realice la agregación de la información se utilizará la técnica comentada.

5.2.4. AHP difuso

El AHP difuso es una extensión de la metodología AHP mediante la combinación de la teoría de conjuntos difusos comentada en apartados anteriores, considerando las operaciones matemáticas que se derivan de dicha teoría.

En la presente Tesis, se utilizará esta extensión de la metodología AHP para la determinación del peso de los criterios. Para ello se emplearán números difusos triangulares mediante las escalas de asignación definidas en la tabla 5.1. Tal y como se ha comentado en la introducción de este capítulo, a consecuencia de tener criterios de naturaleza cualitativa será necesario recurrir al empleo de números difusos triangulares definidos a través de etiquetas lingüísticas y es por ello por lo que se aplicará esta variante del método AHP.

5.3. El método TOPSIS

5.3.1. Introducción

El origen o punto de partida de este método consiste en trabajar con soluciones próximas al ideal y alejadas de la solución anti-ideal, por tanto se definirán previamente dichos conceptos para posteriormente aplicarlos al método TOPSIS.

Sean unas alternativas A_i , $i=1, 2, \dots, m$ y una matriz de decisión con $x_{ij}=U_j(A_i)$, $j=1, 2, \dots, n$. Donde U es la función utilidad del decisor, operando con la base de que todos los criterios sean a maximizar/minimizar y todos los $x_{ij} \geq 0$.



Se denomina *punto ideal* en (\mathcal{R}^n) al punto $A^M = (A_1^M, A_2^M, \dots, A_n^M)$ donde $A_i^M = \text{Max}_i x_{ij}$ para el caso de criterios de beneficio y $A_i^M = \text{Min}_i x_{ij}$ para el caso de criterio de coste. La alternativa A^M se denomina *alternativa ideal*.

Se denomina *punto anti-ideal* en (\mathcal{R}^n) al punto $A^m = (A_1^m, A_2^m, \dots, A_n^m)$ donde $A_i^m = \text{Min}_i x_{ij}$ para el caso de criterios de beneficio y $A_i^m = \text{Max}_i x_{ij}$ para el caso de criterio de coste. La alternativa A^m se denomina *alternativa anti-ideal*.

5.3.2. El Método

El método TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) de Hwang y Yoon (1981), afronta el dilema de utilizar la alternativa ideal, la alternativa anti-ideal o una mezcla de ambas. A modo ilustrativo se representa tal dilema en la figura 5.2.

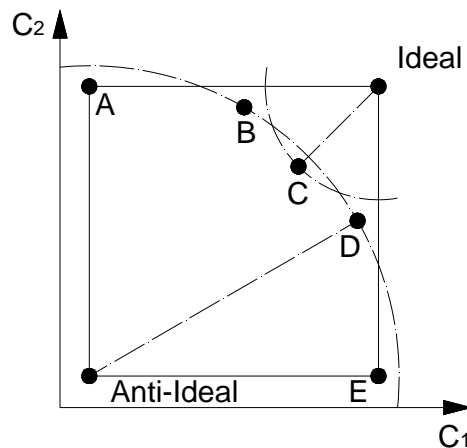


Fig.5.2.- Alternativa ideal vs alternativa no ideal (Cables, E. et al, 2012)

En la fig. 5.2. se representan cinco alternativas (A , B , C , D y E) para un problema de dos criterios, se observa que mientras que la alternativa C es la más próxima al ideal, las alternativas B y D son las más alejadas del anti-ideal. Por tanto, según se decida si se aproxima al ideal o se aleja del anti-ideal se obtendrá una solución u otra.



Para resolver tal dilema, en el algoritmo representado a continuación se definen las etapas a aplicar para la resolución del método TOPSIS.

5.3.3. Algoritmo del método TOPSIS

El esquema del algoritmo se representa en la figura 5.3.

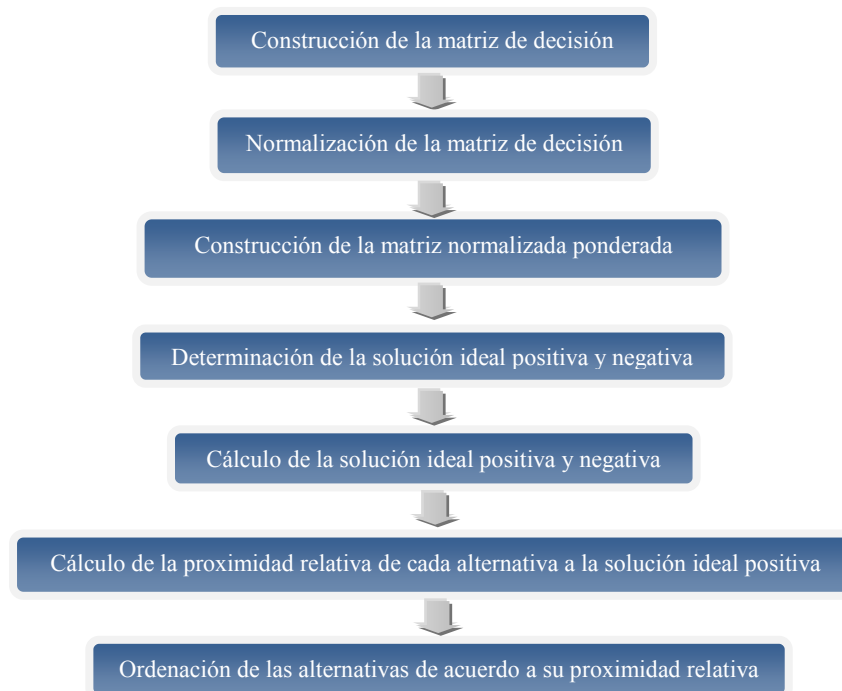


Fig.5.3.- Algoritmo del Método TOPSIS

Etapa 1.- Construcción de la matriz de decisión

Partiendo de m alternativas $A_i, i=1, \dots, m$ que serán evaluadas a partir de los criterios $C_j, j=1, \dots, n$ se obtiene la siguiente matriz de decisión (tabla 5.4.):

	w_1	w_2	...	w_j	...	w_n
	C_1	C_2	...	C_j	...	C_n
A_1	X_{11}	X_{12}	...	X_{1j}	...	X_{1n}
A_2	X_{21}	X_{22}	...	X_{2j}	...	X_{2n}
...
A_m	X_{m1}	X_{m2}	...	X_{mj}	...	X_{mn}

Tabla 5.4.- Matriz de decisión

Donde x_{ij} representa la valoración de la alternativa A_i con respecto al criterio C_j y, $W=[w_1, w_2, \dots, w_n]$ es el vector de pesos asociado con los criterios.

*Etapa 2.- Normalización de la matriz de decisión*

Los elementos de la matriz de decisión normalizada N se obtendrán mediante la siguiente expresión:

$$\bar{n}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (x_{ij})^2}}, \quad j = 1, \dots, n; \quad i = 1, \dots, m \quad (5.8)$$

Etapa 3.- Construcción de la matriz de decisión normalizada ponderada

Los elementos de la matriz de decisión normalizada ponderada V se calcularán con la siguiente expresión:

$$\bar{v}_{ij} = w_j \otimes \bar{n}_{ij}, \quad j = 1, \dots, n; \quad i = 1, \dots, m \quad (5.9)$$

Donde w_j es el peso asociado a cada criterio, dichos valores se obtendrán en este proyecto mediante la metodología AHP.

Etapa 4.- Obtención de la solución ideal positiva (PIS) y la solución ideal negativa (NIS)

Los valores ideales positivos y negativo (\bar{A}^+ y \bar{A}^-) se determinan de la forma:

$$\bar{A}^+ = \left\{ \bar{v}_1^+, \dots, \bar{v}_n^+ \right\} = \left\{ \left(\max_i \bar{v}_{ij}, j \in J \right) \left(\min_i \bar{v}_{ij}, j \in J' \right) \right\} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (5.10)$$

$$\bar{A}^- = \left\{ \bar{v}_1^-, \dots, \bar{v}_n^- \right\} = \left\{ \left(\min_i \bar{v}_{ij}, j \in J \right) \left(\max_i \bar{v}_{ij}, j \in J' \right) \right\} \quad i = 1, 2, \dots, m$$

Donde J está asociado con los criterios de beneficio J (a maximizar) y J' está asociado a criterios de coste (a minimizar).



Etapa 5.- Cálculo de las medidas de distancia

La separación de cada alternativa de la solución ideal positiva \bar{A}^+ está dada como:

$$\bar{d}_i^+ = \left\{ \sum_{j=1}^n \left(\bar{v}_{ij}^- - \bar{v}_j^+ \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (5.11)$$

De igual modo la separación de cada alternativa de la solución ideal negativa \bar{A}^- es:

$$\bar{d}_i^- = \left\{ \sum_{j=1}^n \left(\bar{v}_{ij}^- - \bar{v}_j^- \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (5.12)$$

Etapa 6.- Cálculo de la proximidad relativa a la solución ideal

La proximidad relativa \bar{R}_i a la solución ideal se calculará mediante la expresión:

$$\bar{R}_i = \frac{\bar{d}_i^-}{\bar{d}_i^+ + \bar{d}_i^-} \quad i = 1, \dots, m \quad (5.13)$$

De forma que si:

$$\begin{aligned} \bar{R}_i = 1 &\Rightarrow A_i = \bar{A}^+ \\ \bar{R}_i = 0 &\Rightarrow A_i = \bar{A}^- \end{aligned} \quad (5.14)$$

Cuanto más próximo es el valor de R a la unidad (1) más cerca estará la alternativa i -ésima de la solución ideal.

Etapa 7.- Ordenación de preferencias

Se ordenarán en sentido decreciente las alternativas, comenzando con aquella que más se aproxime a la solución ideal (mayor proximidad relativa).



5.3.4. El método TOPSIS Difuso

El método TOPSIS difuso se deriva del método TOPSIS genérico con las pertinentes adaptaciones de las operaciones asociadas a los números difusos.

En la presente Tesis se utilizará el método TOPSIS difuso para seleccionar el orden de preferencias de las alternativas. La toma de decisión multicriterio se realizará incluyendo tanto valores numéricos reales como etiquetas lingüísticas las cuales pueden expresarse en una matriz del tipo indicado en la tabla 5.5. El argumento mostrado para la aplicación del método AHP difuso es igualmente válido para el método TOPSIS difuso ya que, dado que en el caso estudio que se propone en esta Tesis Doctoral se evalúan las alternativas en función a un número determinado de criterios de diversa naturaleza (de carácter cuantitativo y cualitativo), resulta conveniente utilizar un método que reúna las características definidas en el método TOPSIS difuso. Además, este método dispone de un proceso de cálculo sencillo y eficaz que permite evaluar un número elevado de alternativas como en el caso de estudio que se propone.

5.3.4.1. Algoritmo del método TOPSIS difuso

De manera análoga al método TOPSIS genérico se procederá a describir las etapas del método TOPSIS difuso.

Etapas 1.- Construcción de la matriz de decisión

Es muy importante la construcción de la matriz de decisión para optimizar la ordenación de las mejores alternativas. Como consecuencia, la matriz de decisión puede ser de tres tipos: sólo de valores numéricos (método TOPSIS clásico), solo de valores lingüísticos o una mezcla de ambos. Los métodos de decisión multicriterio convencionales sólo requieren valores precisos para un conjunto finito de alternativas, sin embargo, el entorno de la toma de decisiones real está compuesto de ambos valores (precisos e imprecisos) y por tanto las matrices de decisión contienen información tanto objetiva como subjetiva. Por consiguiente, si todos o algunos de los pesos de los criterios son



imprecisos, la utilización de la teoría de conjuntos difusos es una forma razonable de resolución. La estructura de la matriz puede expresarse como sigue:

	w_1 \sim	w_2 \sim	...	w_j \sim	...	w_n \sim
	C_1	C_2	...	C_j	...	C_n
A_1	X_{11}	X_{12}	...	x_{1j} \sim	...	x_{1n} \sim
A_2	X_{21}	X_{22}	...	x_{2j} \sim	...	x_{2n} \sim
...
A_m	X_{m1}	X_{m2}	...	x_{mj} \sim	...	x_{mn} \sim

Tabla 5.5.- Matriz de decisión difusa

Donde:

- $C_j, j=1, \dots, n$, representan los atributos/criterios en función de los cuales se evalúan las alternativas.
- $A_i, i=1, \dots, n$, denota las posibles alternativas
- $\tilde{W} = \left[\begin{matrix} w_1 & w_2 & \dots & w_n \\ \sim & \sim & & \sim \end{matrix} \right]$ es el vector de pesos asociado con C_j .
- $z_{ij} = \left\{ \begin{matrix} X_{ij}, x_{ij} \\ \sim \end{matrix} \right\}$ representa las valoraciones de A_i con respecto a algún atributo/criterio; siendo $X_{ij} = \left[\begin{matrix} x_{ij}^a & x_{ij}^b & x_{ij}^c \end{matrix} \right]$ la representación de un valor numérico real y $\tilde{x}_{ij} = \left[\begin{matrix} x_{ij}^a & x_{ij}^b & x_{ij}^c \\ \sim & \sim & \sim \end{matrix} \right]$ la representación de valores difusos definidos mediante etiquetas lingüísticas.

Etapa 2.- Normalización de la matriz de decisión difusa

En el método TOPSIS difuso, $\tilde{x}_{ij} = \left[\begin{matrix} x_{ij}^a & x_{ij}^b & x_{ij}^c \\ \sim & \sim & \sim \end{matrix} \right]$ es un número difuso y por tanto se requiere aplicar las operaciones definidas en el capítulo anterior referentes al modelado lingüístico difuso.



Etapa 3.- Construcción de la matriz de decisión normalizada ponderada

De manera similar al TOPSIS clásico, se normalizará y ponderará la matriz de decisión difusa, para ello se aplicarán las expresiones 5.8 y 5.9 teniendo en cuenta las operaciones para números difusos (apartado 4.2.1.4.).

Etapa 4.- Cálculo de las medidas de distancia

La distancia es el grado o cantidad de separación entre dos puntos, líneas, superficies u objetivos. En la versión difusa del método se realiza el cálculo de la distancia a la solución ideal positiva difusa *FPIS* y de la solución ideal negativa difusa *FNIS* mediante las expresiones de valores ideales positivos y negativo (5.10) y las medidas de distancia (5.11 y 5.12)

Etapa 5.- Cálculo de la proximidad relativa a la solución ideal

De igual manera que en el TOPSIS clásico, se procederá a calcular la proximidad relativa con la consideración de las operaciones correspondientes a la utilización de números difusos (expresiones 5.13 y 5.14).

Etapa 6.- Ordenación de preferencias

Se ordenan las mejores alternativas de acuerdo con \bar{R}_i en orden descendente, teniendo en cuenta que los valores de \bar{R}_i serán números difusos por los que hay que establecer un procedimiento de defuzzificación, en la presente Tesis se aplicará el procedimiento de García-Cascales y Lamata (2007) representado en el capítulo anterior mediante la expresión 4.8.



5.4. El método ELECTRE-TRI

La metodología ELECTRE ha sido ampliamente utilizada por investigadores y profesionales alcanzando especial relevancia. Está basada en el concepto de superación, que indica el grado de dominación de una alternativa sobre otra. Desde su aparición, el desarrollo de esta metodología ha provocado la creación de diversas versiones ELECTRE I (Roy, B., 1968), ELECTRE II (Roy y Bertier, 1971, 1973), ELECTRE III (Roy, B., 1978), ELECTRE IV (Roy y Hugonnard, 1982 a y b), ELECTRE IS (Roy y Skalka, 1985), ELECTRE TRI (Roy y Bouyssou, 1991) (Yu, 1992 a y b), resultando esta última la más utilizada en la actualidad.

5.4.1. Principio del método

ELECTRE-TRI (Roy y Bouyssou, 1991) (Yu, 1992 a y b), es un método que asigna categorías previamente definidas a un grupo de alternativas. La asignación de una alternativa a en una categoría u otra se obtiene a través de comparar dicha alternativa con los límites de las categorías predefinidas.

El método ELECTRE-TRI responde a la problemática de la segmentación, la cual hace referencia a juicios absolutos. Consiste en asignar cada alternativa a una categoría predefinida por una serie de normas o características. Según Martínez y Rodríguez (2005), asignar una alternativa a_k a una categoría determinada es el resultado de una valoración intrínseca en función de unos determinados criterios y de los límites o referencias establecidos para la categoría (la asignación de a_k a una categoría específica no influye en la asignación del resto de alternativas).

5.4.2. Desarrollo del método

De forma abreviada se podría indicar que el método ELECTRE.TRI asigna las alternativas objeto de análisis a las distintas categorías siguiendo dos procedimientos consecutivos: 1) la construcción de una relación de superación o sobreclasificación S (comúnmente denominada relación “outranking”) que permite establecer una comparación entre las alternativas y los límites que definen las categorías; y 2) la

explotación (mediante procedimientos de asignación) de la relación S con el fin de asignar cada alternativa a una categoría específica.

Sea F la serie de criterios g_1, g_2, \dots, g_m ($F=1, 2, \dots, m$) y B la serie de límites de los perfiles que definen $p+1$ categorías ($B=\{1, 2, \dots, p\}$). siendo b_h el límite superior de la categoría C_h y el límite inferior de la categoría C_{h+1} , con $h=1, 2, \dots, p$. Resulta posible representar los límites de las distintas categorías de la forma indicada en la figura 5.4. Donde los límites b_0 y b_{p+1} corresponden a las alternativas anti-ideal e ideal respectivamente.

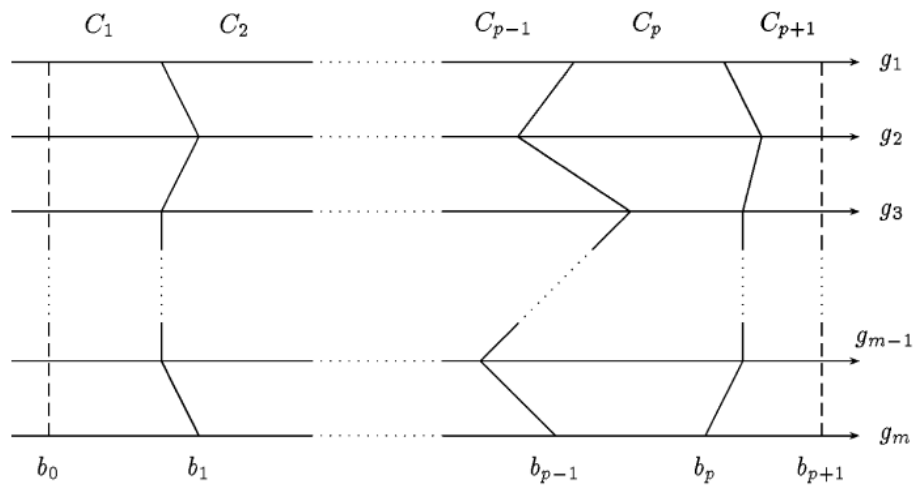


Fig.5.4.- Definición de las categorías mediante límites de perfiles (Mousseau et al, 2000)

ELECTRE-TRI construye una relación de superación S es decir, válida o inválida la afirmación aSb_h (y b_hSa) cuyo significado es “la alternativa a es al menos tan buena como b_h ”

5.4.2.1. Definición de acciones de referencia

Existen diversas formas de definir las acciones de referencia en función a la problemática a resolver es decir, del planteamiento del problema de decisión (Roy, 1985) y, llevar a cabo la asignación de alternativas a categorías predefinidas se corresponde precisamente con el fundamento de la metodología ELECTRE-TRI. Para ello, se definen las acciones de referencia como los límites de las distintas categorías



que permiten clasificar las acciones potenciales (las alternativas a evaluar en cualquier problema de decisión).

Los umbrales que determinan la importancia de cada criterio se definen a través de pseudo-criterios (Roy y Vincke, 1984). Los umbrales de preferencia $p_j(b_h)$ e indiferencia $q_j(b_h)$ constituyen la información preferencial entre criterios de forma que $q_j(b_h)$ representa la mayor diferencia $g_j(a)-g_j(b_h)$ que mantiene la indiferencia entre a y b_h para el criterio g_j y, $p_j(b_h)$ representa la menor diferencia $g_j(a)-g_j(b_h)$ compatible con una preferencia de a en función del criterio g_j . Siendo para ambos umbrales $g_j(a)$ el valor del criterio j para la alternativa a y $g_j(b_h)$ el valor de dicho criterio en el límite superior de la categoría C_h .

El resto de parámetros a definir para aplicar el método corresponden a los pesos de los criterios es decir, los coeficientes de importancia de cada criterio (k_1, k_2, \dots, k_m) y, los umbrales de veto $v_j(b_h)$ los cuales representan la menor diferencia $g_j(b_h)-g_j(a)$ incompatible con la afirmación aSb_h . Una vez definidos la totalidad de parámetros se está en disposición de aplicar el método ELECTRE TRI.

5.4.2.2. Índices de concordancia

5.4.2.2.1. Índices de concordancia por criterio

Representa un indicador que muestra como la alternativa o acción a_i es al menos tan buena como b_h , para el criterio c_j . Se construyen de la forma representada en la figura 5.5.

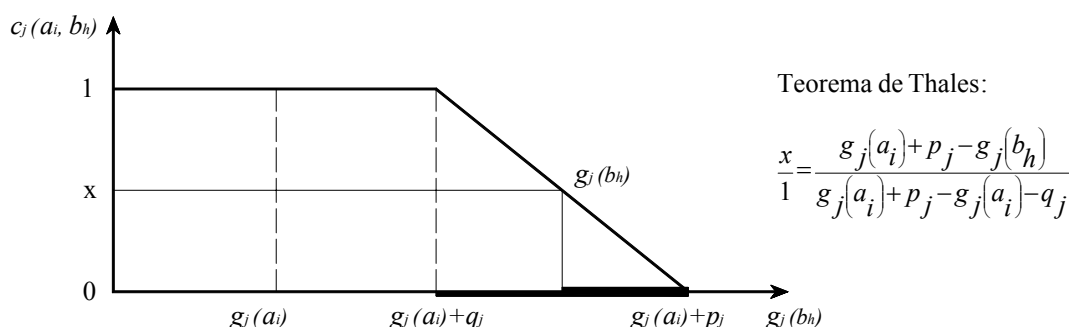


Fig.5.5.- Construcción de un índice de concordancia (Maystre et al, 1994)



El índice de concordancia para un criterio dado $c_j(a_i, b_h)$, está definido de la siguiente forma:

$$c_j(a_i, b_h) = 0 \Leftrightarrow p_j < g_j(b_h) - g_j(a_i)$$

$$0 < c_j(a_i, b_h) < 1 \Leftrightarrow q_j < g_j(b_h) - g_j(a_i) \leq p_j \Rightarrow c_j(a_i, b_h) = \frac{g_j(a_i) + p_j - g_j(b_h)}{p_j - q_j} \quad (5.15)$$

$$c_j(a_i, b_h) = 1 \Leftrightarrow g_j(b_h) - g_j(a_i) \leq q_j$$

5.4.2.2.2. Índice de concordancia global

Es un indicador que expresa hasta qué punto las evaluaciones de a y b_h en todos los criterios concuerdan con la afirmación de que “ a es al menos tan buena como b_h ” (o b_h es al menos tan bueno como a). Se calcula a partir de los índices de concordancia para cada uno de los criterios, en el caso de analizar en qué medida todos los criterios concuerdan con la afirmación “ a supera b_h ”, el índice de concordancia global estaría definido por la expresión siguiente

$$C(a_i, b_h) = \frac{\sum_{j \in F} k_j \cdot c_j(a_i, b_h)}{\sum_{j \in F} k_j} \quad (5.16)$$

5.4.2.3. Índices de discordancia por criterio

Es un indicador que expresa en qué medida el criterio g_j se opone a la afirmación de que “ a es al menos tan buena como b_h ” (i.e, a supera a b_h) o a la inversa. Un criterio es discordante con la afirmación de “ a supera a b_h ” cuando para dicho criterio la alternativa b_h es preferida a la alternativa a es decir, cuando $c_j(b_h, a) = 1$ y $c_j(a, b_h) = 0$. En el caso de que la preferencia sea creciente, el criterio g_j se opone cuando la diferencia $g_j(b_h) - g_j(a)$ excede el umbral de veto v_j . Se construye de la forma mostrada en la figura 5.6.



Teorema de Thales :

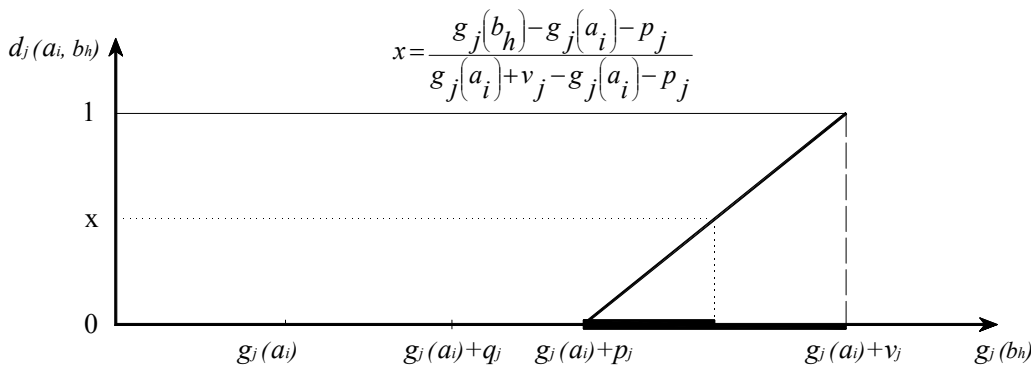


Fig.5.6.- Construcción de un índice de discordancia (Maystre et al, 1994)

Los índices de discordancia se obtienen a partir de las siguientes expresiones:

$$d_j(a_i, b_h) = 0 \Leftrightarrow g_j(a_i) > g_j(b_h) - p_j$$

$$0 < d_j(a_i, b_h) < 1 \Leftrightarrow g_j(b_h) - v_j < g_j(a_i) \leq g_j(b_h) - p_j \Rightarrow d_j(a_i, b_h) = \frac{g_j(b_h) - g_j(a_i) - p_j}{v_j - p_j} \quad (5.17)$$

$$d_j(a_i, b_h) = 1 \Leftrightarrow g_j(b_h) - v_j(b_h) \geq g_j(a_i)$$

5.4.2.4. Grado de credibilidad

Es un indicador que considera de forma conjunta los índices de concordancia globales ($C(a_i, b_h)$) y los índices de discordancia ($d_j(a_i, b_h)$) por lo que expresa en qué grado “a supera a b_h ” y “ b_h supera a a”. Por tanto, los índices de credibilidad $\sigma_s(a_i, b_h)$ y $\sigma_s(b_h, a_i)$ proporcionan dos relaciones de superación evaluadas entre la acción a y la acción de referencia b_h . El grado de credibilidad se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_s(a_i, b_h) = C(a_i, b_h) \cdot \prod_{j \in \bar{F}} \frac{1 - d_j(a_i, b_h)}{1 - C(a_i, b_h)} \quad (5.18)$$

donde $\bar{F} = \{j \in F / d_j(a_i, b_h) > C(a_i, b_h)\}$

5.4.2.5. Relación de superación o sobreclasificación

La relación de superación (figura 5.7.) entre una acción potencial a y una acción de referencia b_h se establece a partir de los grados de credibilidad y de un umbral de corte constante λ que corresponde con el menor valor del grado de credibilidad a partir del cual la afirmación “ a supera a b_h ” es válida, es decir, se corrobora tal afirmación (aSb_h) cuando $\sigma_s(a_i, b_h) \geq \lambda$.

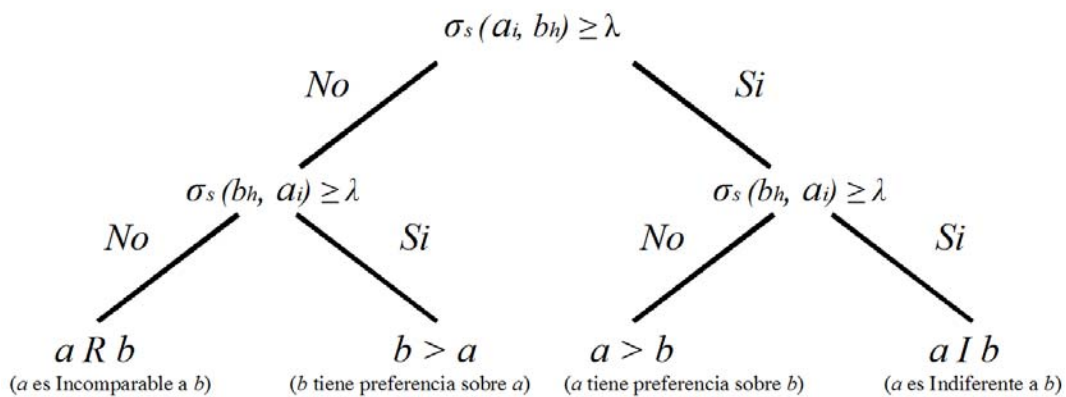


Fig.5.7.- Relación de sobreclasificación (relación “outranking”)

5.4.2.6. Procedimientos de asignación

Una vez que una alternativa a_i ha sido comparada con las acciones o perfiles de referencia b_h , en ELECTRE TRI existen dos procedimientos para asignar una alternativa a_i a una de las categorías previamente definidas:

- Procedimiento pesimista (o conjuntivo): Consiste en comparar la alternativa a_i sucesivamente con los diferentes perfiles o acciones de referencia $b_{i/(i=p, p-1, \dots, 0)}$, comenzando por los perfiles más altos hasta encontrar el perfil b_h para el cual aSb_h y una vez encontrado se asigna la alternativa a_i a la categoría C_{h+1} .
- Procedimiento optimista (o disyuntivo): Consiste en comparar la alternativa a_i sucesivamente con los diferentes perfiles o acciones de referencia $b_{i/(i=0, 1, 2, \dots, p)}$, comenzando por los perfiles más bajos hasta encontrar el perfil b_h para el cual b_hSa y una vez encontrado se asigna la alternativa a_i a la categoría C_h .



5.5. Software IRIS

Una vez desarrollada la metodología ELECTRE-TRI se estará en condiciones de clasificar las alternativas analizadas, no obstante a consecuencia de la complejidad en su cálculo, el número de operaciones a realizar, etc. requiere la necesidad de una herramienta informática capaz de llevar a cabo tales procesos sin la cual, la aplicación del mismo resultaría un proceso arduo, lento y laborioso. La herramienta informática utilizada en la presente Tesis Doctoral se denomina IRIS y consiste en un sistema de ayuda a la decisión diseñado para resolver problemas de clasificación, es decir, clasifica y asigna una serie de alternativas de decisión en categorías predefinidas mediante criterios de evaluación múltiple.

5.5.1. Introducción

El software IRIS implementa la metodología propuesta por Dias et al (2002) utilizando el procedimiento pesimista de ELECTRE TRI, sin necesidad de recurrir a un decisor para indicar los valores precisos de todos los parámetros (Dias y Mousseau, 2003a).

El software IRIS construye un modelo ELECTRE TRI de dos formas en función de si el decisor o usuario del programa se considera un experto en la toma de decisiones. En el caso de que el usuario únicamente introduzca los parámetros necesarios para el desarrollo del modelo sin ser un experto en la temática objeto de la decisión, el software proporcionará la clasificación de alternativas en categorías previamente definidas. En cambio, si el usuario se puede considerar a su vez experto en el problema de toma de decisión a analizar, el software ofrece la posibilidad de realizar un proceso iterativo en la medida de que los resultados de una iteración dada pueden ser utilizados para guiar al decisor en la revisión de las entradas para la siguiente iteración es decir, mediante la modificación de los parámetros introducidos (añadir o eliminar restricciones, modificar el umbral de corte, etc.), se puede observar los efectos de los cambios realizados y de esta forma aprender continuamente no sólo del problema de decisión sino también de sus propias preferencias y de los efectos que éstas provocan en los resultados. En ambos casos el proceso puede iniciarse con escasa información; alternativas a clasificar (a_i),



criterios (g_m), acciones o perfiles de referencia (b_h), umbrales de preferencia, indiferencia y veto (p_j , q_j y v_j), valor de corte (λ) y con pocas o ninguna restricciones adicionales sobre las alternativas a clasificar.

La finalidad del proceso interactivo es reducir progresivamente el conjunto de combinaciones aceptables para los parámetros introducidos, de acuerdo con un proceso de aprendizaje que favorezca la elaboración de los resultados obtenidos. De hecho, el decisor puede proceder mediante un proceso de ensayo y error, imponiendo nuevas restricciones que posteriormente pueden ser descartadas de forma que, cuando considere que los resultados están de acuerdo con sus expectativas y sus propósitos, puede finalizar el proceso.

Al finalizar este proceso interactivo de ayuda a la decisión, el decisor debe ser capaz de encontrar información acerca de:

- La asignación de cada alternativa a una sola categoría o rango de categorías obtenidas a través de valores aceptables de los parámetros.
- Una combinación precisa de valores de los parámetros, definidos mediante el método de clasificación ELECTRE TRI.
- Los valores aceptables para los parámetros, posiblemente incluyendo un conjunto de ejemplos de clasificación y otras restricciones sobre los parámetros

5.5.2. Entrada de datos

Una vez iniciado el programa, el decisor debe introducir una serie de parámetros resumidos en las siguientes páginas o pestañas:

- A) *Página de acciones* (figura 5.8.): Corresponden a aquellas alternativas a_i que serán objeto del proceso de clasificación, por ello se introducen los valores de la totalidad de alternativas que posteriormente serán clasificadas en categorías en función del número de criterios que influirán en la decisión y al número de categorías. Si el usuario cree que alguna de las alternativas introducidas debe



pertenecer a una categoría concreta, tiene la libertad de situarla en dicha categoría y una vez que se ejecute IRIS, podrá observar si su suposición inicial es consistente con el resto de parámetros introducidos.

Actions	Fixed Par.	Bounds	Constraints					
Action	ELow	EHigh	g1	g2	g3	g4	g5	g6
a1	1	4	5.111	18.361	360	1869381.	25	1
a2	1	4	5	8.385	360	1459838.	1391.929	1
a3	1	4	6.737	17.985	360	1449796.	314.162	1
a4	1	4	3.357	17.848	360	1437455.	346.053	1
a5	1	4	3.6	4.011	360	1342150.	5261.26	1459.9
a6	1	4	6	16.244	360	1213962.	25	1
a7	1	4	4.545	5.516	360	1214563.	25	1
a8	1	4	3	5.992	360	1076798.	5641.718	1366.6
a9	1	4	4.636	8.977	360	1029892.	25	9768.1
a10	1	4	4.8	10.308	360	995818.8	25	1
a11	1	4	5.375	2.193	360	983920.5	25	3274.2
a12	1	4	3.4	5.181	360	958597.7	152.885	1
a13	1	4	3.75	2.088	360	913552.9	25	40.644
a14	1	4	4.833	8.228	360	886366.2	943.817	1
a15	1	4	3.846	3.181	360	862128.8	973.374	1
a16	1	4	4.118	14.047	360	863065.4	25	1
a17	1	4	5	19.32	360	828404.8	959.207	93.938
a18	1	4	4.833	11.154	360	821109.4	1037.921	1

Fig.5.8.- Página de acciones en IRIS

B) *Página de fijación de parámetros* (figura 5.9): En ella se introducen los valores de los perfiles o acciones de referencia (b_n) que definen las distintas categorías, los criterios que influyen en la decisión indicando si son a maximizar o minimizar y, los umbrales de preferencia, indiferencia y veto (p_j , q_j y v_j) para cada uno de los criterios los cuales son valores no negativos y además ordenados ($q_j \leq p_j \leq v_j$). Por ejemplo, dadas dos alternativas a_j y a_k que se desean comparar, los umbrales de preferencia, indiferencia y veto entre ambas se definen de la siguiente forma:

- Umbral de preferencia (p_j): magnitud en que se exige que el valor de la alternativa a_j sea mayor que el de la alternativa a_k para que haya una preferencia fuerte de la primera respecto a la segunda.
- Umbral de indiferencia (q_j): magnitud en que se permite que el valor de la alternativa a_k sea menor que el de la alternativa a_j para seguir siendo indiferentes.

- Umbral de veto (v_j): magnitud de la diferencia ($a_j - a_k$) a partir de la cual nunca se aceptará que la alternativa a_k supere a la alternativa a_j , aunque la supere en el resto de criterios.

Actions	Fixed Par.	Bounds	Constraints					
	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	g8
g(b1)	2	30	225	300	10000	10000	100	15000
q1	1	1	3	10	10	10	75	150
p1	4	5	3	10000	200	50	250	1000
v1	6	15	45	200000	5500	9000	1500	14000
g(b2)	4	20	270	1500	5000	1000	500	5000
q2	1	1	3	10	10	10	75	150
p2	4	5	3	10000	200	50	250	1000
v2	6	15	45	200000	5500	90000	1500	14000
g(b3)	7	10	345	10000	100	100	1000	500
q3	1	1	3	10	10	10	75	150
p3	4	5	3	10000	200	50	250	1000
v3	6	15	45	200000	5500	9000	1500	14000
MAX/min	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1

Fig.5.9.- Página de fijación de parámetros en IRIS

- C) *Página de fijación de límites* (figura 5.10): El usuario debe editar los valores máximos y mínimos del valor o umbral de corte (λ). También debe indicar los pesos o coeficientes de importancia de los criterios (k_m) en el caso de que éstos sean conocidos, en caso contrario será suficiente con indicar el intervalo de valores en el que oscilarán.

Actions	Fixed Par.	Bounds	Constraints					
	lambda	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7
LB - Lower	0.67	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
UB - Upper	0.8	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

Fig.5.10.- Página de fijación de límites en IRIS

- D) *Página de restricciones* (figura 5.11.): Las restricciones que deben respetar los pesos y el valor de corte se deben introducir en esta página con el objetivo de limitar y restringir la clasificación de alternativas en IRIS. En esta etapa el usuario debe introducir el número de restricciones y, en el caso de que éste no



sea experto en la temática objeto de la decisión, deberá introducir las restricciones proporcionadas por los expertos. Sin embargo si el usuario es a su vez experto en el problema de toma de decisión a analizar puede modificar el número de restricciones según su criterio.

	lambda	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7
Norm	1	1	1	1	1	1	1	1
ad1		-1						
ad2			-1					
ad3				-1				
ad4					-1			
ad5						-1		
ad6							-1	
ad7								-1
ad8								
ad9								
ad10		-1					1	
ad11			-1				1	
ad12				-1			1	
ad13					-1		1	

Fig.5.11.- Página de restricciones en IRIS

5.5.3. Salida de resultados

Una vez introducida la totalidad de parámetros en las páginas de entrada de datos, resulta posible ejecutar el software IRIS y observar los resultados que proporciona. IRIS muestra mediante colores (figura 5.12) en qué categoría se debería situar cada alternativa sin violar las restricciones y los límites introducidos.

	lambda	k1	k2	k3	k4	k5
LB - Lower	0.67	0.				
UB - Upper	0.8	0.				

	C1	C2	C3	C4
a1				
a2				
a3				
a4				
a5				
a6				
a7				
a8				
a9				
a10				
a11				
a12				
a13				

	lambda	k1	k2	k3	k4	k5
	0.76727	0.026364	0.10818	0.091818	0.14091	0.0

Fig.5.12.- Salida de resultados en IRIS



En la figura 5.12. se observan diferentes tonalidades para el color verde. Si el color verde es oscuro indica que esa categoría es la elección recomendada por IRIS mientras que, el color verde claro indica hacia que categorías puede tender cada alternativa sin provocar situaciones de inconsistencia. En la última fila de la página de resultados se muestra la combinación (deducida por IRIS) de los parámetros inicialmente introducidos que respetan todos los límites y restricciones. La última línea en la página de resultados muestra la combinación de parámetros de cada una de las celdas coloreadas por ejemplo, en el caso de la figura 5.12. se muestra la combinación de parámetros que permitirían situar a la alternativa 2 en la categoría C3.

Si al introducir los parámetros de entrada y ejecutar el software hay alguna alternativa en color rojo (figura 5.13.) significa que no hay ninguna combinación de parámetros que respete los límites y restricciones introducidos, en ese caso no se genera ninguna clasificación válida ya que el software interpreta que la entrada de datos es inconsistente y se debe buscar y corregir dicha situación de inconsistencia.

Action	ELow	EHigl
a2	1	4
a3	1	4
a4	1	4
a5	1	4
a6	1	4
a7	1	4
a8	1	4
a9	1	4
a10	1	4
a11	1	4
a12	1	4
a13	1	4
a14	1	4
a15	1	4
a16	1	4
a17	4	4
a18	1	4
a19	1	4
a20	1	4

Results	Inferred constraints	Infer. Prog.			
	C1	C2	C3	C4	
a1		Dark Green			
a2				Light Green	
a3				Light Green	
a4				Light Green	
a5		Light Green			
a6				Light Green	
a7				Light Green	
a8		Light Green			
a9			Light Green		
a10		Light Green			
a11		Light Green			
a12				Light Green	
a13				Light Green	
a14				Light Green	
a15				Light Green	
a16		Light Green			
a17		Red		Light Green	
lambda	k1	k2	k3	k4	k5
0.335	0	0	0.33	0.335	0

Fig.5.13.- Situación de inconsistencia en IRIS

Una vez obtenida la clasificación de cada alternativa mediante las categorías previamente definidas y solucionado cualquier situación de inconsistencia (en el caso de que existiese), IRIS está en condiciones de proporcionar un informe el que se muestran



las alternativas analizadas, la categoría en la que estarían situadas y los parámetros introducidos inicialmente por el usuario.

5.6. Aplicación de la metodología descrita al caso de estudio

En este capítulo se ha desarrollado distintas metodologías de decisión multicriterio, éstas serán utilizadas en la presente Tesis Doctoral de la siguiente forma:

- Inicialmente, con los resultados proporcionados por el SIG se aplicará una metodología híbrida para la evaluación de las alternativas, por un lado se recurrirá al método AHP difuso para la obtención del peso de los criterios y por otro el método TOPSIS difuso para la evaluación de las alternativas. De este modo se permite trabajar con una combinación de metodologías que utiliza las fortalezas de cada uno de los métodos clásicos comentados.
- Posteriormente se seleccionaran las 20 mejores alternativas obtenidas con TOPSIS difuso y se volverán a analizar a través de dos métodos de decisión multicriterio, por una lado se aplicará el método ELECTRE TRI a través del software IRIS y por otro el método TOPSIS sin aplicar lógica difusa (denominado clásico o crisp. De esta forma se analizarán ambos métodos con vistas a estudiar sus diferencias y observar en qué aspectos son coincidentes.

5.7. Referencias bibliográficas del Capítulo V

Alonso, J.A. y Lamata, M.T., (2006). Consistency in the Analytic Hierarchy Process: A new approach. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 14, 4, pp. 445–459.

Bana e Costa, C.A. y Vansnick, J.C., (2008). A critical analysis of the eigenvalue method used to derive priorities in AHP. *European Journal of Operational Research*. 187. pp. 1422–1428

Cables, E., Garcia-Cascales, M.S. y Lamata, M.T., (2012). The LTOPSIS: An alternative to TOPSIS decision-making approach for linguistic variables. *Expert Systems with Applications*, 39, pp. 2119–2126



- Dias, L.C. y Mousseau, V., 2003. IRIS: A DSS for Multiple Criteria Sorting Problems, *Journal of Multicriteria Decision Analysis*, 12. pp. 285-298.
- Dias, L.C. y Mousseau, V., 2003, *IRIS: Interactive Robustness analysis and parameters' Inference for multicriteria Sorting problems (Version 2.0)*. User Manual. Institute of Systems Engineering and Computers INESC Coimbra. 1.
- Dias, L., Mousseau, V., Figueira, J., y Clímaco, J., 2002. An Aggregation/Disaggregation Approach to Obtain Robust Conclusions with ELECTRE TRI., *European Journal of Operational Research*, 138, pp. 332-348.
- García-Cascales, M.S. y Lamata, M.T., (2007). A modification of the index of Liou and Wang for ranking fuzzy number," *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 15. 4, pp. 411-424.
- Hwang, C.L. y Yoon, K., (1981). *Multiple Attribute Decision Methods and Applications*, Springer, Berlin Heidelberg ed.
- Martínez-Roget, F., y Rodríguez-González, X.A., 2005. Asignación de ayudas públicas mediante ELECTRE-TRI. Una aplicación al turismo rural en Galicia. *Estudios de Economía Aplicada*. 23-1. pp. 255-278.
- Maystre, L.Y., Pictet, J. y Simos, J., (1994). *Méthodes multicritères ELECTRE. Description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. Ed. 1. Lausanne.
- Roy, B., (1985). *Methodologie Multicritere d'Aide a la Decision Economica*. Paris.
- Roy B, (1991). Decision-Aid and Decision Making, *European Journal of Operational Research*, 45, pp. 324-331.
- Roy, B., (1968). Classement et choix en presence de points de vue multiples (la method ELECTRE), *Revue informatique et recherché opérationnelle*. 8. pp. 57-75.
- Roy, B., (1978). ELECTRE III: un algorithme de classement fondé sur une représentation floue des préférences en présense de critères multiples, *Cahiers du CERO*, 20. 1. pp. 3-24.
- Roy, B. y Bertier, P., (1971). La méthode ELECTRE II: une méthode de classement en présense de critères multiples, *SEMA (Metra International)*, 142. Paris. 25 p.



- Roy, B. y Bertier, P., (1973). La méthode ELECTRE II: une application au media-planning. Ross M. (ed.) *Operational Research 1972*. North-Holland Publishing Company. pp. 291-302.
- Roy, B. y Bouyssou, D. (1991). *Aide à la decision fondée sur une PAMC de type ELECTRE*. Université Paris-Dauphine. Document du LAMSADE, 69. 118 p.
- Roy, B. y Hugonnard, J.C., (1982a). Classement des prolongements de lignes de metro en banlieue parisienn (presentation d'une method multicritère originale), *Cahier du CERO*, 24. 2-3-4. pp. 153-171.
- Roy, B. y Hugonnard, J.C., (1982b). Le plan d'extension du metro en banlieue parisienn, un cas type de l'analyse multicritère, *Les Cahiers scientifiques de la revue Transports*. 6, pp. 77-108.
- Roy, B. y Skalka, J.M., (1985). *ELECTRE IS: aspects méthodologiques et guide d'utilisation*. Université Paris-Dauphine. Document du LAMSADE, 30. 125 p.
- Roy B, y Vincke Ph., (1984). Relational systems of preferences with one or more pseudo-criteria: some new concepts and results. *Management Science*, 30, 11, pp. 1323-34.
- Saaty, T.L., (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York.
- Saaty, T., (1990). An exposition of the AHP. In reply to the paper. Remarks on the analytic hierarchy process, *Management science*, 36. 3, pp. 259-268.
- Yu, W., (1992a). *Aide multicritère à la decision dans le cadre de la problématique du tri concepts, méthodes et applications*, These de doctorat, UER Sciences de l'organisation, Université Paris-Dauphine. 201 p.
- Yu, W., (1992b). *ELECTRE TRI. Aspects méthodologiques et manuel d'utilisation*. Université Paris-Dauphine. Document du LAMSADE, 74. 80 p.

TERCERA PARTE:

**BÚSQUEDA Y EVALUACIÓN DE
EMPLAZAMIENTOS ÓPTIMOS PARA
ALBERGAR INSTALACIONES DE
ENERGÍAS RENOVABLES EN LA COSTA
DE LA REGIÓN DE MURCIA**





CAPÍTULO VI

SELECCIÓN DE LAS SUPERFICIES APTAS PARA ALBERGAR INSTALACIONES DE EERR







*“Mil rutas se apartan del fin elegido,
pero hay una que llega a él”.*

Montaigne

CAPÍTULO VI

SELECCIÓN DE LAS SUPERFICIES APTAS PARA ALBERGAR INSTALACIONES DE EERR

6.1. Introducción

6.1.1. Descripción de la metodología

Decidida la herramienta informática a utilizar como sistema de información geográfica, gvSIG, se procederá a describir el procedimiento de trabajo a seguir fundamentado en la bibliografía estudiada.

El primer paso consistirá en obtener la base de datos que, en este caso corresponderá con la información cartográfica necesaria para comenzar con el tratamiento de datos en gvSIG, esta información deberá ser analizada previamente a través de un estudio profundo del marco legal relacionado con la zona objeto de estudio para, posteriormente ser introducida en el software en forma de capas temáticas.

En la figura 6.1. se representa el diagrama o esquema del proceso a seguir para la obtención de las superficies aptas para albergar instalaciones de EERR.



Fig. 6.1.- Proceso a seguir para la obtención de superficies aptas

Las capas temáticas deberán contener toda la información posible relacionada con la implantación de una instalación de EERR en un espacio al aire libre y que incluso supusiera un gran impacto visual y medioambiental. Cualquier aspecto que pudiera limitar el llevar a cabo una instalación de este calibre debía ser tenido en cuenta para poder ofrecer una visión lo más realista del resultado final y de mejor aplicabilidad.

Los principales criterios a tener en cuenta para la búsqueda de la información cartográfica serán los siguientes:

- Definir el marco legal de la zona objeto de estudio, es decir, la normativa vigente que deberá ser tenida en cuenta para llevar a cabo el análisis, ésta podrá ser municipal, regional o estatal.
- Las capas temáticas deberán estar actualizadas según su correspondiente marco legal con el objetivo de evitar errores en su posterior tratamiento. De igual modo, deberán presentar un formato compatible con gvSIG para un correcto manejo de la aplicación



Una vez obtenida la totalidad de la base de datos y con carácter previo a su tratamiento en el software gvSIG, se hace necesario por un lado llevar a cabo un filtrado de la misma para delimitar la zona de estudio y por otro ordenarla en función a su posterior uso o aplicación.

6.2. Zona de estudio

La delimitación del territorio consiste en acotar el área de estudio sobre la cual se va a llevar a cabo el análisis posterior. Tal y como se describió en el Capítulo II de la presente Tesis, el área de estudio está situada dentro del territorio de la Región de Murcia y, entre las diversas zonas que constituyen dicha Región (Altiplano, Noroeste y Costa), para llevar a cabo una búsqueda exhaustiva de emplazamientos óptimos con el objetivo de implantar instalaciones de EERR, la costa o el litoral es la que conlleva una mayor problemática a consecuencia de la limitación de espacio que supone el alto nivel de ocupación urbanística y residencial por lo que, realizar un estudio con mayor grado de precisión en dicha zona, supondrá un importante avance de cara al desarrollo e implantación de este tipo de instalaciones.

Colindante con los municipios del litoral se sitúa el municipio de Murcia, éste ocupa una elevada extensión de territorio en el que confluyen zonas de alta ocupación urbanística (residencial e industrial) con zonas protegidas por lo que, llevar a cabo un análisis detallado en dicho municipio es también de un elevado interés así que, se considerará en la presente Tesis que dicho municipio forma parte del litoral con la finalidad de poder proceder a su evaluación. Por todo ello, se ha escogido como zona de estudio de la presente Tesis, el Litoral de la Región de Murcia (Figura 6.2.)

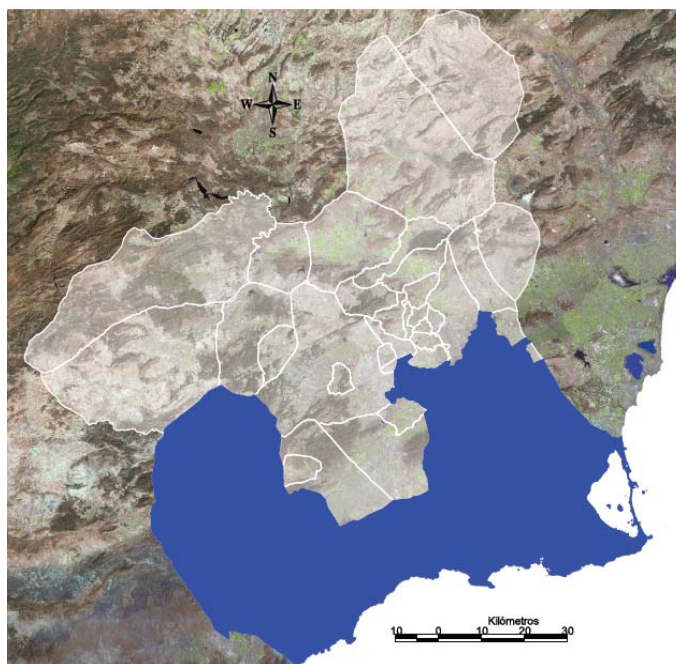


Fig. 6.2.- Litoral de la Región de Murcia

El litoral de la Región de Murcia está situado en el extremo oriental de las Cordilleras Béticas, en el sureste de España. Limita de este a oeste con el Mar Mediterráneo y Andalucía respectivamente, por ello el clima de este territorio es de marcado carácter Mediterráneo, es decir con inviernos suaves y veranos calurosos. Su disposición orográfica (al este de las Cordilleras Béticas) dificulta la llegada de borrascas atlánticas por lo que las precipitaciones medias son escasas. No obstante, a pesar del predominio mediterráneo, la topografía variable de su territorio en la que se alternan valles, depresiones, montañas, llanuras, etc. provoca una gran diversidad de matices en su entorno.

Aunque el eje principal de la red hidrográfica de la Región de Murcia lo constituye el Río Segura, existen multitud de cauces y ramblas que vierten directamente sus aguas a la costa mediterránea o al Mar Menor, una extensa laguna natural de agua salada situada junto al Mar Mediterráneo. La accidentada mezcla de relieves y depresiones generadas con el transcurso del tiempo y las características climatológicas, han permitido dotar de una gran riqueza de fauna, flora, formas y paisajes al litoral mediterráneo murciano, a consecuencia de ello, en la Red Natura 2000 (Directiva 92/43/CEE y Ley 42/2007) se



declararon 72 áreas en la Región de Murcia con un elevado valor ecológico clasificadas en Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPAs) y Lugares de Importancia Comunitaria (LIC).

El litoral mediterráneo junto con el Mar Menor comprenden la mayor parte de zonas protegidas por lo que su conservación constituye uno de los pilares de las diversas políticas de la Región ya que tanto la presión urbana (a consecuencia de la alta ocupación urbanística de la zona) y la explotación agrícola intensiva son los principales peligros que se ciernen sobre el litoral murciano y es, precisamente por estos motivos por los que establecer con exactitud las zonas aptas para implantar instalaciones de EERR en el litoral es de extraordinaria importancia.

El litoral de la Región de Murcia está constituido por 13 municipios: Lorca, Puerto Lumbreras, Mazarrón, Águilas, Fuente Álamo, Cartagena, La Unión, Torre-Pacheco, Alcantarilla, Murcia, Los Alcázares, San Javier y San Pedro del Pinatar. La metodología de trabajo a desarrollar consistirá en partir de la totalidad de la superficie que comprenden los 13 municipios indicados para, posteriormente reducir dicha superficie a través de las restricciones que sea necesario considerar.

6.3. Marco legal: Normativa.

Para llevar a cabo la metodología de trabajo descrita en la presente Tesis, es necesario tener en cuenta la normativa o legislación vigente ya que el estudio de ésta, será el que permita obtener las restricciones que habrá que considerar para obtener las superficies aptas, para tal finalidad la legislación vigente analizada es la siguiente:

- Decreto 102/2006, de 8 de junio, por el que se aprueban las Directrices y Plan de Ordenación Territorial del Suelo Industrial de la Región de Murcia.
- Ley 16/1985 de 25 de Junio de Patrimonio Histórico Español.
- Decreto 180/1987, de 26 noviembre 1987. Regulación de actuaciones arqueológicas BO. Región de Murcia 4 enero 1988, núm. 2/1988.



- Ley 4/1990 de 11 de Abril de medidas de fomento del Patrimonio Histórico de la Región de Murcia.
- Decreto Legislativo 1/2005, de 10 de junio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley del Suelo de la Región de Murcia.
- Ley 4/2007, de 16 de marzo, de Patrimonio Cultural de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.
- Directiva 2009/147/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de noviembre de 2009, relativa a la conservación de las aves silvestres.
- Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad.
- CORRECCIÓN de errores de la Ley 42/2007, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad.
- Ley 4/92 de 30 de Julio, de Ordenación y Protección del Territorio de la Región de Murcia
- Planes Generales Municipales de Ordenación (PGOU) y Normas Subsidiarias (NNS).
- Decisión del consejo 1999/800/CE, del 22 de octubre, relativa a la conclusión del Protocolo sobre las zonas especialmente protegidas y la diversidad biológica en el Mediterráneo, así como a la aceptación de los correspondientes anexos (Convenio de Barcelona)
- Directiva 92/43/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1992, relativa a la Conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres.
- Ley 3/1995, de 23 de marzo, de Vías Pecuarias.
- Real Decreto 1471/1989, de 1 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento General para Desarrollo y Ejecución de la Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas.
- Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas.
- Ley 4/2009, de 14 de mayo, de Protección Ambiental Integrada.
- Ley 7/95 de 21 de abril, de Fauna Silvestre de la Región de Murcia.
- Ley 25/1988, de 29 de julio, de Carreteras.



6.4. Capas temáticas. Procedencia y adecuación

6.4.1. Procedencia de capas temáticas

La base de datos necesaria para obtener las superficies aptas donde se pueda implantar una instalación de EERR estará constituida por las capas temáticas que serán introducidas en el software gvSIG para su posterior edición y procesamiento, la procedencia de éstas debe ser segura y fiable ya que, de cualquier otro modo se podría inducir a errores en el origen mismo del proceso. Por ello, se recurrirá a las fuentes conocidas que dispongan de la información cartográfica y georreferenciada necesaria.

En la Región de Murcia existen en la actualidad dos servidores cartográficos de libre acceso (SITMURCIA y CARTOMUR). Aunque el software gvSIG es capaz de acceder a ellos a través de su servidor de mapas web (WMS), no resulta posible la edición ni procesamiento de las capas temáticas que disponen, por lo que, para su obtención es necesario solicitarlas directamente a los organismos de la administración regional correspondientes. Las capas temáticas que serán utilizadas y su correspondiente procedencia son las indicadas en la Tabla 6.1.

<i>Capa Temática</i>	<i>Procedencia</i>
Límites municipales de la Región de Murcia	
Sistemas Generales, (actual. marzo 2010)	
Clasificación y calificación del suelo	Consejería de Obras Públicas y Ordenación del Territorio,
Patrimonio cultural	Unidad de Información
Protecciones arqueológicas	Territorial
Protecciones paleontológicas	
Inventario de cauces	
Inventario de ZEPAs, (actual. enero 2005)	Servicio público de
Inventario de LICs, (actual. septiembre 2004)	Geocatálogo, Consejería de
Inventario de montes de la Región de Murcia	Agricultura y Agua
Protección de costas	
Información catastral de los municipios que componen el litoral de la Región de Murcia	Dirección General del Catastro. Ministerio de Economía y Hacienda

Tabla 6.1.- Capas temáticas.- Denominación y procedencia



De las capas temáticas indicadas, se extraerá la información necesaria para la creación de la base de datos que permita obtener las superficies aptas donde albergar una instalación de EERR es decir, habrá que realizar un filtrado de la información proporcionada con el objetivo de clasificarla y reducirla a la exclusivamente necesaria para facilitar su procesamiento posterior.

6.4.2. Adecuación de capas temáticas

Con carácter previo a la aplicación de restricciones, resulta conveniente tener en cuenta una serie de criterios ambientales tales como áreas protegidas, de alto valor paisajístico, zonas de interés cultural, arqueológico y paleontológico, áreas de difícil acceso como montes o pendiente elevada, etc. (Voivontas et al, 1997).

La consideración de dichos criterios en procesos de toma de decisiones cuyo objetivo consiste en seleccionar la mejor zona para implantar una instalación de EERR, son bastante frecuentes (Arán Carrión, 2008), de tal manera que las zonas en las que está definido un criterio ambiental (área protegida, de alto valor paisajístico, etc.) será menos aconsejable la instalación de esta índole.

Utilizando como premisa lo expuesto anteriormente, la metodología a utilizar para la elección de zonas viables o superficies aptas para la ubicación de plantas de EERR no se encaminará a la valoración en orden de preferencia de los criterios ambientales, sino que se eliminarán de la totalidad de la superficie del litoral de la Región de Murcia, las zonas que a consecuencia de la normativa actual, no sean aptas para albergar una instalación de EERR.

Por lo tanto, la idea de la presente Tesis Doctoral consistirá en eliminar de la totalidad de territorio escogido, aquellas zonas en las que supondría un impedimento instalar una planta de energía solar fotovoltaica, termoeléctrica o un parque eólico. Los criterios a analizar serán los siguientes:

- Tipología del suelo, Catalogación del suelo.
- Vías de comunicación.



- Infraestructuras.
- Orografía.
- Hidrología.
- Patrimonio.
- Áreas Protegidas.

Mediante tales criterios se definirá una serie de capas temáticas que constituirán las restricciones que presentará el territorio objeto de estudio, por ello, se introducirán en el software gvSIG con la finalidad de restar la superficie que ocupan respecto a la totalidad del territorio, éstas se agruparán en la siguientes capas temáticas:

- Suelos urbanos y no urbanos con protección especial
- Áreas de alto valor paisajístico, sistemas generales hidráulicos y vías pecuarias
- Cauces y ramblas
- Patrimonio cultural, arqueológico y paleontológico
- Carreteras, infraestructuras aeroportuarias y red de ferrocarril
- Lugares de Importancia Comunitaria (LICs)
- Zonas de especial protección para aves (ZEPA's)
- Protección costera y montes

A continuación se procederá a describir el proceso descrito en la fase de tratamiento y adecuación de las capas temáticas proporcionadas.

6.4.2.1. Capa de límites municipales de la Región de Murcia

Al introducir esta capa en el software gvSIG, en la ventana de éste se observa la totalidad de los municipios de la Región de Murcia, debido a que la zona de estudio de la presente Tesis abarca el litoral, se hace necesario mediante algunas de las herramientas y comandos del software gvSIG descritas en el capítulo III (en este caso a través de un filtrado), eliminar de dicha capa los municipios que no sean objeto de estudio. En la figura 6.3. se muestran en diferentes colores los municipios a analizar una vez que se han descartado aquellos municipios que no forman parte del litoral.

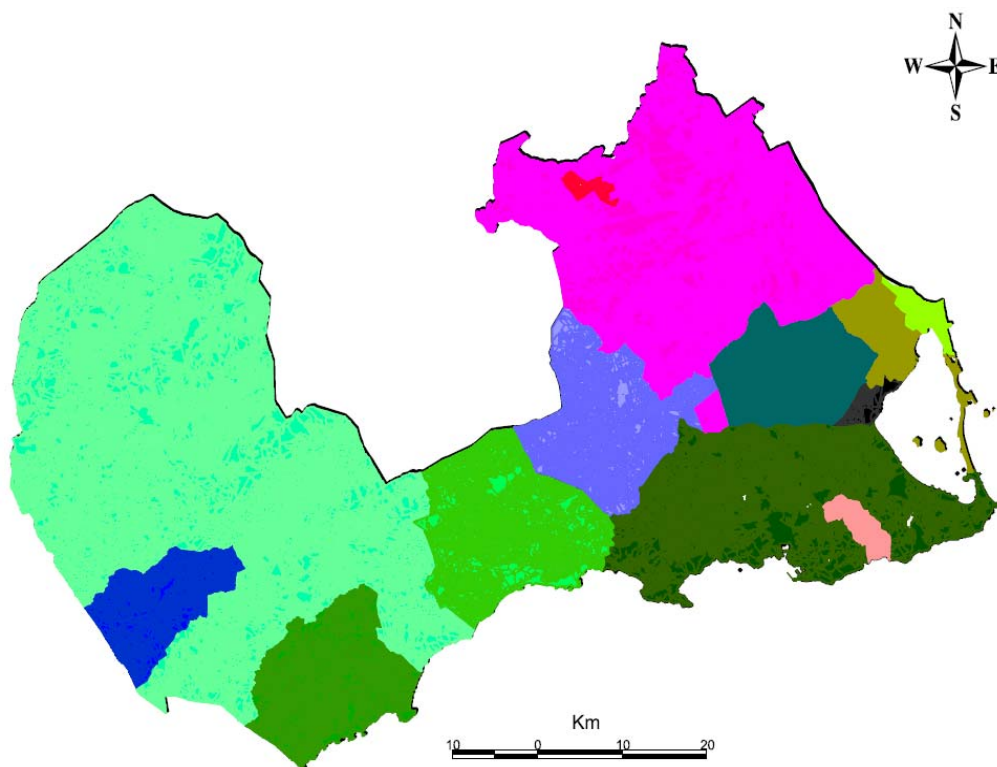


Fig. 6.3.- Municipios del Litoral de la Región de Murcia

6.4.2.2. Capa de sistemas generales

La capa de sistemas generales contiene bastante información que será tenida en cuenta para obtener las superficies aptas para albergar instalaciones de EERR. Por ello el procedimiento de adecuación de esta capa consistirá en extraer de la misma aquella información temática relacionada con los criterios citados anteriormente (catalogación de suelo, infraestructuras, vías de comunicación, hidrología, etc.), la cual será definida mediante distintas capas según su naturaleza. La adecuación se llevará a cabo a través de diversas herramientas y comandos del software gvSIG comentados en el Capítulo III de la presente Tesis.

6.4.2.2.1. Capa de suelos urbanos y no urbanos con protección especial

Entre la información que proporcionan la capa de sistemas generales, destacan los sistemas generales de ordenación de los municipios que abarcan la zona de estudio.



Según su normativa urbanística, los municipios tendrán definida una clasificación y uso de suelo, pudiendo ser éste de la siguiente forma:

- Suelo Urbano de Núcleo Rural.
- Suelo Urbano Consolidado.
- Suelo Urbano.
- Suelo Urbanizable Sin Sectorizar.
- Suelo Urbanizable Sectorizado.
- Suelo Urbanizable Programado.
- Suelo Urbanizable No Programado.
- Suelo No Urbanizable de Protección Específica.
- Suelo No Urbanizable.
- Suelo Apto para Urbanizar.

Según la normativa vigente (Decreto 102/2006 y PGOU), entre las distintas clases de suelo definidas, no se podrá implantar ninguna instalación de EERR en suelos urbanos de cualquier tipo ni en suelos urbanizables o aptos para urbanizar. De igual modo según la Ley 42/2007, de 13 de diciembre, Ley 4/92 de 30 de Julio y Ley 4/2009, de 14 de mayo, en suelos no urbanizables con la catalogación de protección especial o específica tampoco se podrá llevar a cabo ninguna infraestructura ya que dichas zonas disponen de parques naturales, lugares de interés geológico (LIG), humedales de importancia internacional, etc. de forma que, ejecutar cualquier instalación de EERR podría dañar el patrimonio natural y la biodiversidad existente.

Por tanto, considerando las indicaciones anteriores, se podrá extraer de la capa de sistemas generales, una capa temática que comprenda la zona de estudio y que reúna los distintos tipos de suelos urbanos y aquellos que presenten algún tipo de protección especial (figura.6.4.).

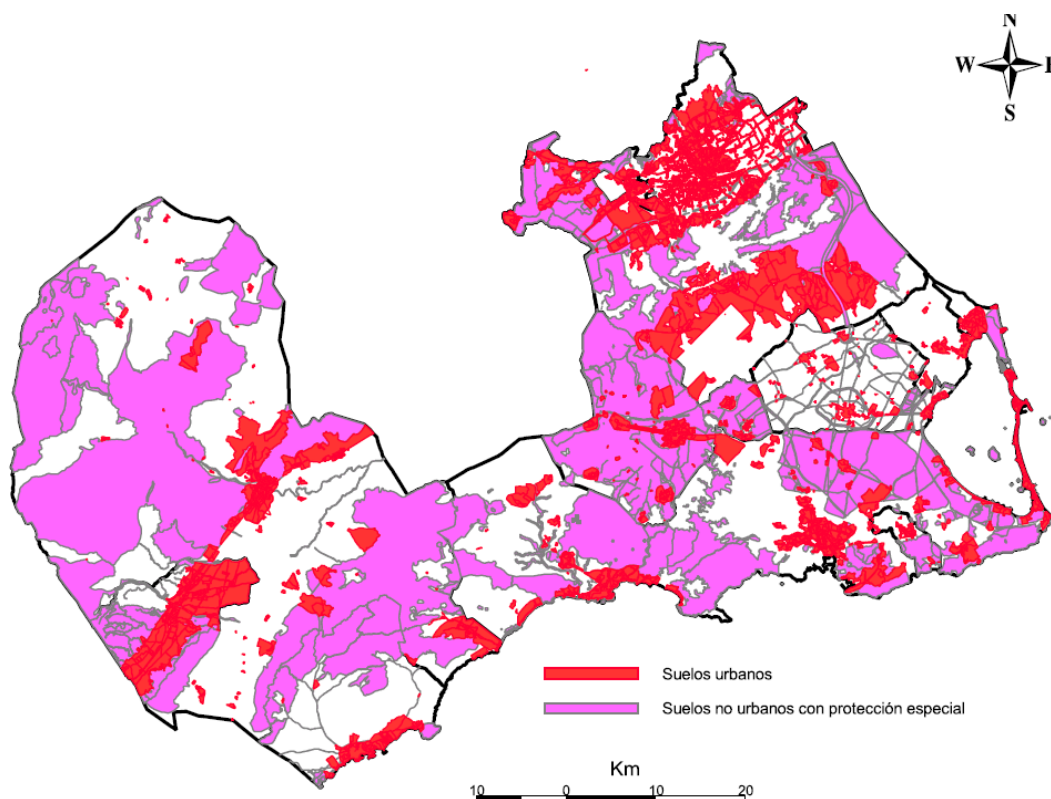


Fig. 6.4.- Capa temática de suelos urbanos y no urbanos con protección especial

6.4.2.2.2. Capa de áreas de alto valor paisajístico, equipamientos, sistemas generales hidráulicos y vías pecuarias

Procedimiento de forma similar al desarrollo descrito en el apartado anterior se extraerá de la capa de sistemas generales la información temática correspondiente a zonas de alto valor paisajístico ya que dichas áreas están protegidas en la actualidad a través de las leyes de patrimonio natural y de la biodiversidad indicadas anteriormente. De igual modo existen actualmente una serie de infraestructuras tales como equipamientos (zonas públicas tales como polideportivos, cementerios, etc.), sistemas generales hidráulicos (depuradoras, grupos de bombeo municipales, etc.) y vías pecuarias en las que, tanto por la superficie que ocupan en sí mismas como por la protección de sus zonas adyacentes, implantar cualquier tipo de infraestructura (no sólo relacionadas con EERR) está totalmente prohibido.

Considerando las indicaciones anteriores y recurriendo de nuevo al software gvSIG, se podrá extraer de la capa de sistemas generales, una nueva capa temática que reúna tanto las áreas que presenten un elevado valor paisajístico, los equipamientos, los sistemas generales hidráulicos y las vías pecuarias (figura.6.5.).

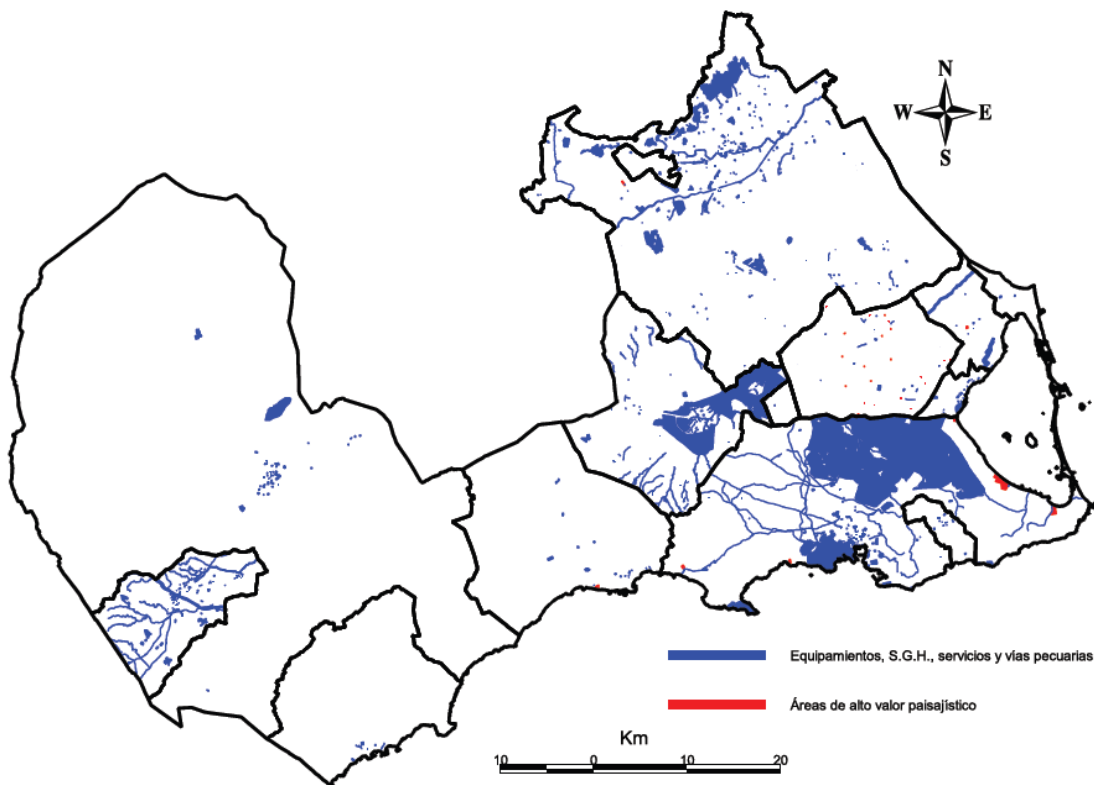


Fig. 6.5.- Capa temática de Áreas de alto valor paisajístico / Equipamientos, sistemas generales hidráulicos y vías pecuarias

6.4.2.2.3. Capa de carreteras y red de ferrocarril

Tomando de nuevo como punto de partida la capa de sistemas generales, resulta posible obtener una nueva capa temática que muestre la red de carreteras y de ferrocarril existente en la Región de Murcia.

La ley 25/1988, de 29 de julio, de Carreteras establecen las zonas de protección a las que debe estar sometida una vía; distancia de 25 metros como zona de servidumbre a

ambos lados de autopistas, autovías, vías rápidas y de 8 metros en el resto de las carreteras. Por el hecho de estimar el criterio más conservador y en vistas a posibles ampliaciones de la red viaria existente se optará por estimar una zona de servidumbre de 25 metros.

Es posible proceder de forma similar con la red de ferrocarril con la salvedad de que, en este caso la normativa en vigor (PGOU) establece la no edificación en anchura de 15 metros desde el eje de la vía exterior.

Introduciendo la capa de sistemas generales en gvSIG y aplicando la herramienta de cálculo del software (área de influencia) que permita obtener las bandas de protección o zonas de servidumbre indicadas se obtiene la capa temática de carreteras y red de ferrocarril representada en la figura 6.6.

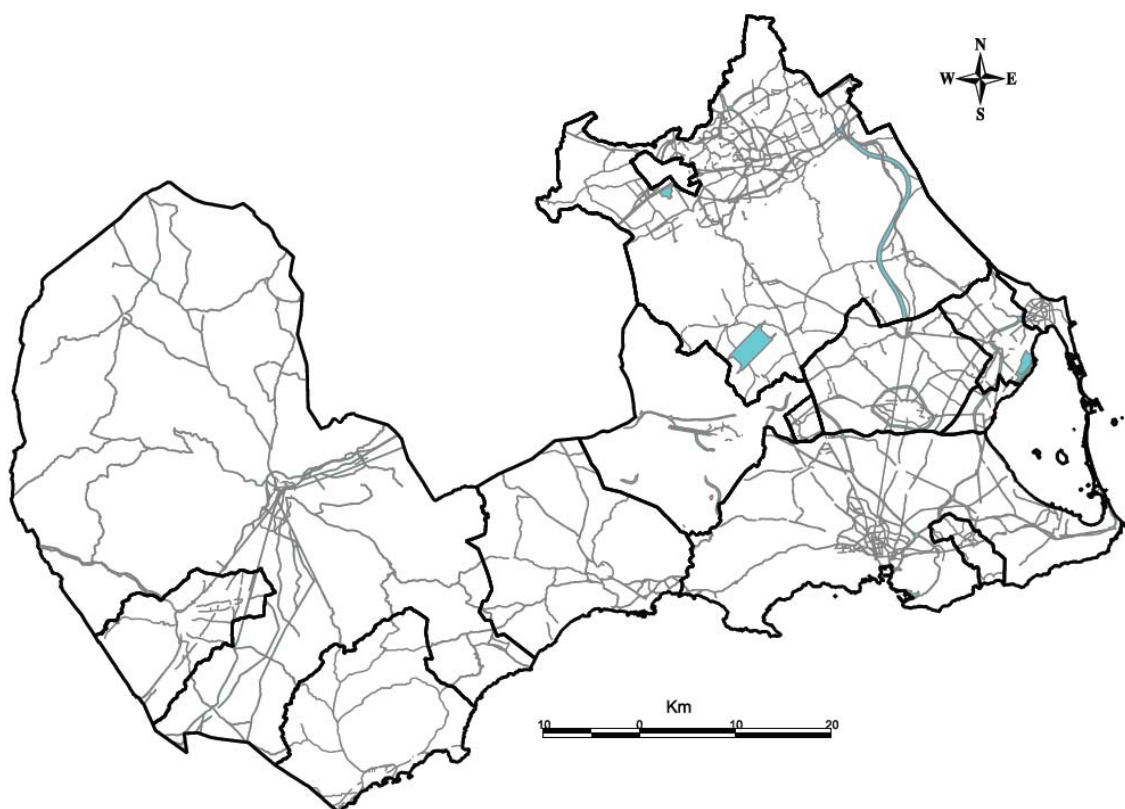


Fig. 6.6.- Capa temática de Carreteras, infraestructuras aeroportuarias y Red Ferroviaria



6.4.2.3. Capa de cauces y ramblas

Inicialmente se introducirá la capa temática del Inventario de Cauces de la Región de Murcia, posteriormente se llevará a cabo un filtrado para delimitar su información y abarcar únicamente el área del territorio objeto de estudio. Finalmente será necesario analizar el marco legal que afecta a cauces y ramblas y en el mismo destaca lo siguiente: Las Directrices y Plan de Ordenación Territorial del Litoral de la Región de Murcia establecen respecto a cauces de dominio público, una banda de protección a ambos lados de los mismos de 100 metros es decir, no se permitirá llevar a cabo construcción alguna tanto en el propio cauce o rambla como en la banda de protección descrita.

Por tanto mediante los comandos de gvSIG, para considerar la banda de protección que indica normativa vigente se aumentará el espesor de los diferentes cauces situados en el litoral de la Región de Murcia, obteniéndose de esta forma una capa temática como la mostrada en la figura 6.7.

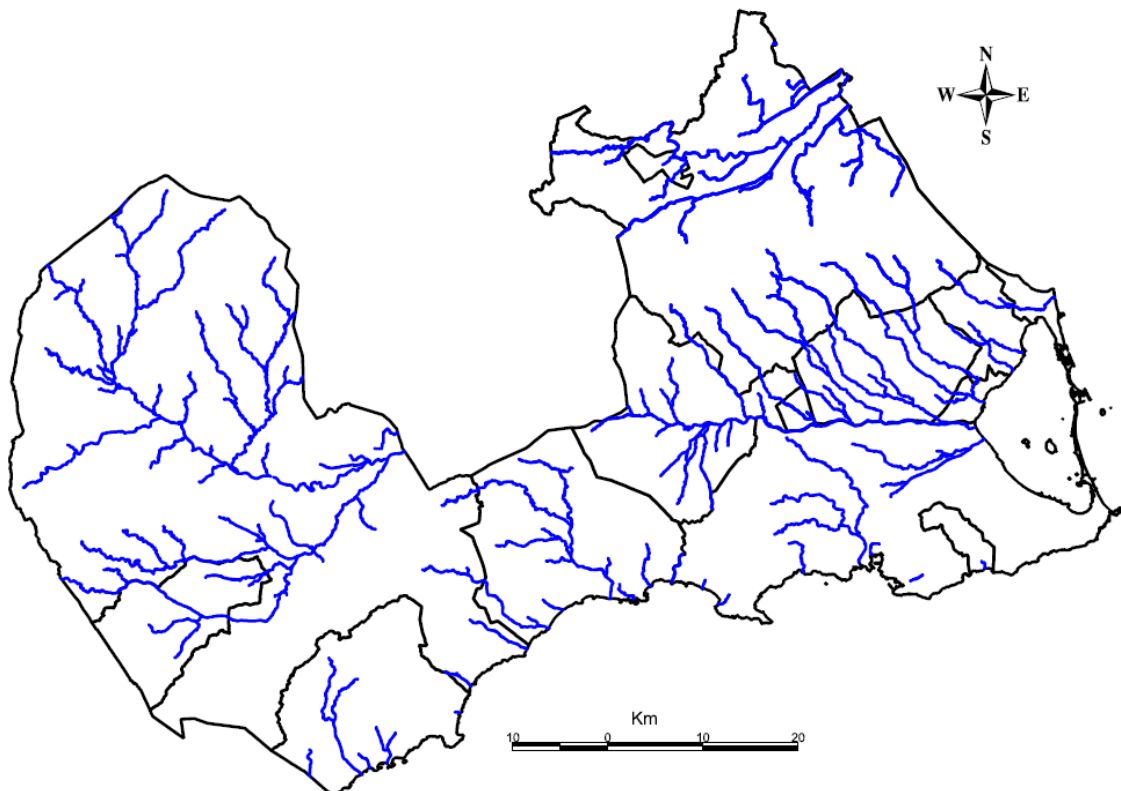


Fig. 6.7.- Capa temática de Cauces y Ramblas



6.4.2.4. Capa de patrimonio arqueológico, paleontológico y cultural

El primer paso a llevar a cabo con las capas proporcionadas de patrimonio arqueológico, paleontológico y cultural será agruparlas en una única capa temática.

Tanto la Ley 16/1985, de 25 de junio, de Patrimonio Histórico Español como el Decreto Legislativo 1/2001 de 24 de abril, del Suelo de la Región de Murcia establecen medidas positivas de conservación y fomento de los bienes, espacios y elementos dignos de especial protección por sus valores históricos, artísticos, culturales y tradicionales. Por ello estos bienes deben de conservarse y mantenerse no pudiendo por tanto utilizar la superficie o territorio que ocupan para albergar cualquier tipo de infraestructura.

De forma similar al proceso desarrollado con la capa temática de cauces y ramblas, se deberá proceder con los yacimientos arqueológicos ya que, según las Directrices y Plan de Ordenación Territorial del Litoral de la Región de Murcia, será necesario proteger dichos yacimientos a través de una banda de protección de 100 metros en la que no podrá instalarse infraestructura alguna.

Teniendo en consideración los criterios mencionados y utilizando los diversos comandos o herramientas de gvSIG, se obtendrá la capa temática agrupada de patrimonios arqueológico, cultural y paleontológico (figura 6.8.).

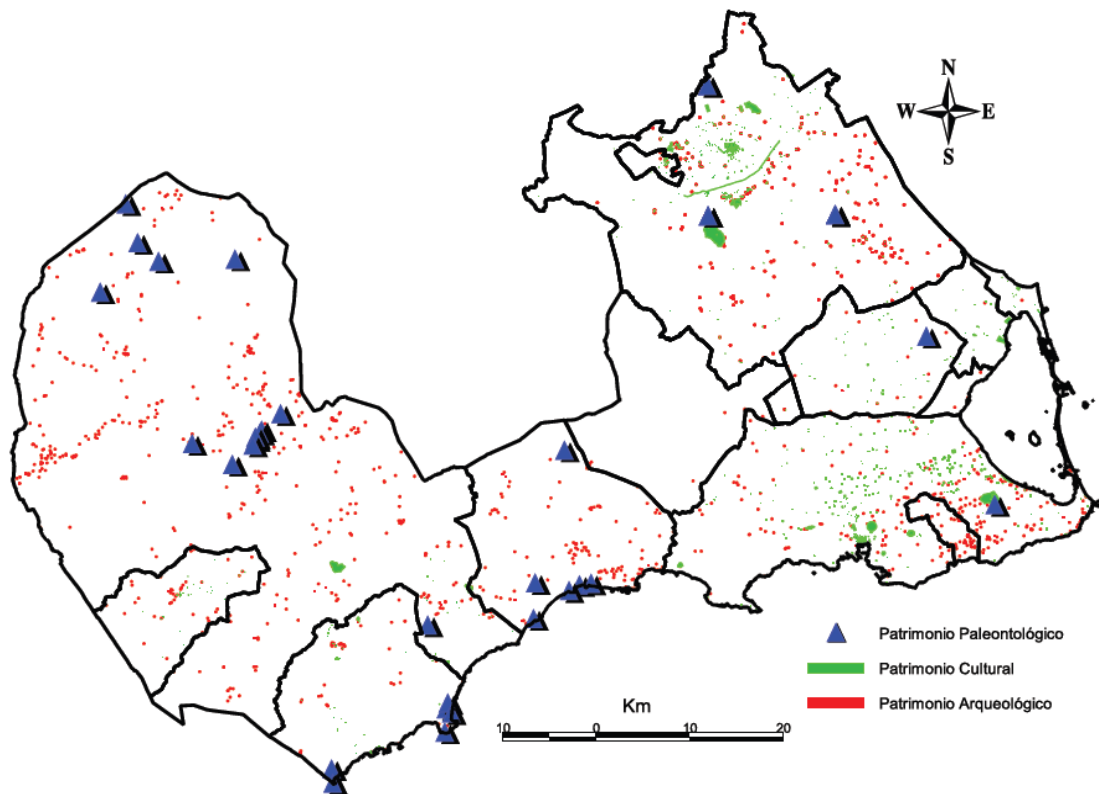


Fig. 6.8.- Capa temática de Patrimonio Arqueológico, Paleontológico y Cultural

6.4.2.5. Capa de montes y protección de costas

Tomando como punto de partida la capa temática de Montes de la Región de Murcia proporcionada por la Consejería de Agricultura y Agua, se llevará a cabo un filtrado para reflejar únicamente los montes que estén situados dentro de la zona de estudio.

En esta capa temática resulta conveniente indicar que, aunque la ubicación de una instalación de EERR (del tipo energía solar fotovoltaica o termoeléctrica) en un monte supondría por un lado un gran impacto visual y por otro una elevada inversión a consecuencia del alto porcentaje de inclinación o pendiente. Debido a las altas velocidades del viento que se generan, el hecho de poder implantar un parque eólico en la cima de una montaña (siempre y cuando el resto de criterios sean positivos) es favorable para este tipo de instalaciones. Por ello la capa temática que represente los montes del litoral supondrá una restricción si el objetivo es buscar emplazamientos

óptimos de instalaciones solares pero no será tenida en cuenta como restricción para el caso de instalaciones de energía eólica.

Para obtener la capa temática de protección de costas se recurrirá a la capa del litoral de la Región de Murcia, la información temática de ésta, al igual que otras citadas anteriormente, está sujeta a su respectivo marco legal (Ley 22/1988 de costas) según el cual habrá una zona de protección del dominio público marítimo-terrestre. La servidumbre de dicha protección recaerá sobre una zona de 100 metros medida tierra adentro desde el límite interior de la ribera del mar. Por todo lo cual aplicando la forma de proceder descrita para anteriores capas temáticas, se obtendrá una nueva capa temática que contendrá la información de los montes y protección costera en el litoral de la Región de Murcia (figura 6.9.)

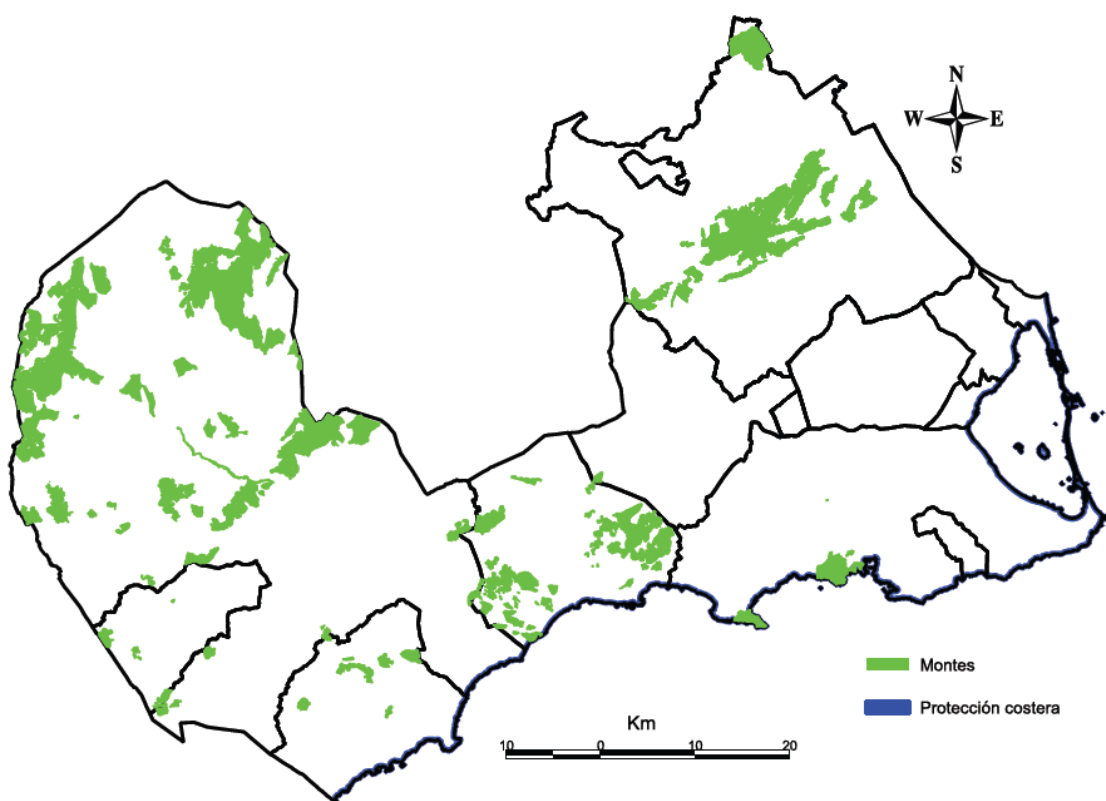


Fig. 6.9.- Capa temática de Protección costera y montes



6.4.2.6. Capa de Lugares de Importancia Comunitaria (LICs)

Los lugares de importancia comunitaria (LICs) son espacios protegidos por la Red Natura 2000, ésta es una red ecológica europea de conservación de la biodiversidad que consta de zonas especiales de conservación designadas de acuerdo con la Directiva Hábitat (Directiva 92/43/CEE del Consejo, de 21 de mayo) relativa a, la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres en la que se establece por primera vez el principio de conservación de los hábitats naturales como tales, y no sólo como el medio en el que viven las especies.

La finalidad de la Red Natura 2000 consiste en asegurar la supervivencia a largo plazo de las especies y los hábitats más amenazados de Europa, contribuyendo a detener la pérdida de biodiversidad ocasionada por el impacto adverso de las actividades humanas constituyéndose por tanto, en el principal instrumento para la conservación de la naturaleza en la Unión Europea.

En la Región existen un total de 50 Lugares de Importancia Comunitaria (LICs), cuarenta y siete se ubican en el medio terrestre y tres en el medio marino. Entre esos 50 LICs, más de la mitad (concretamente 26) están situados en la zona de estudio y, según los Planes Generales de Ordenación Urbana de los municipios afectados, se debe establecer una zona de amortiguación de 100 metros (entre un LIC y cualquier infraestructura a realizar) calificada como sistemas generales de espacios libres o suelos no urbanizables por tanto, en las inmediaciones de un LIC resulta necesario mantener una zona de protección de distancia 100 m.

Por tanto será necesario considerar los LICs como una nueva capa temática de restricción, en la que no se podrá implantar una instalación de EERR (incluyendo la zona de amortiguamiento). Para obtener dicha capa se aplicará inicialmente un filtrado y recorte sobre la capa original de la región. Posteriormente se definirá un área de influencia de 100 metros abarcando de esta forma la zona de protección indicada (figura 6.10.).

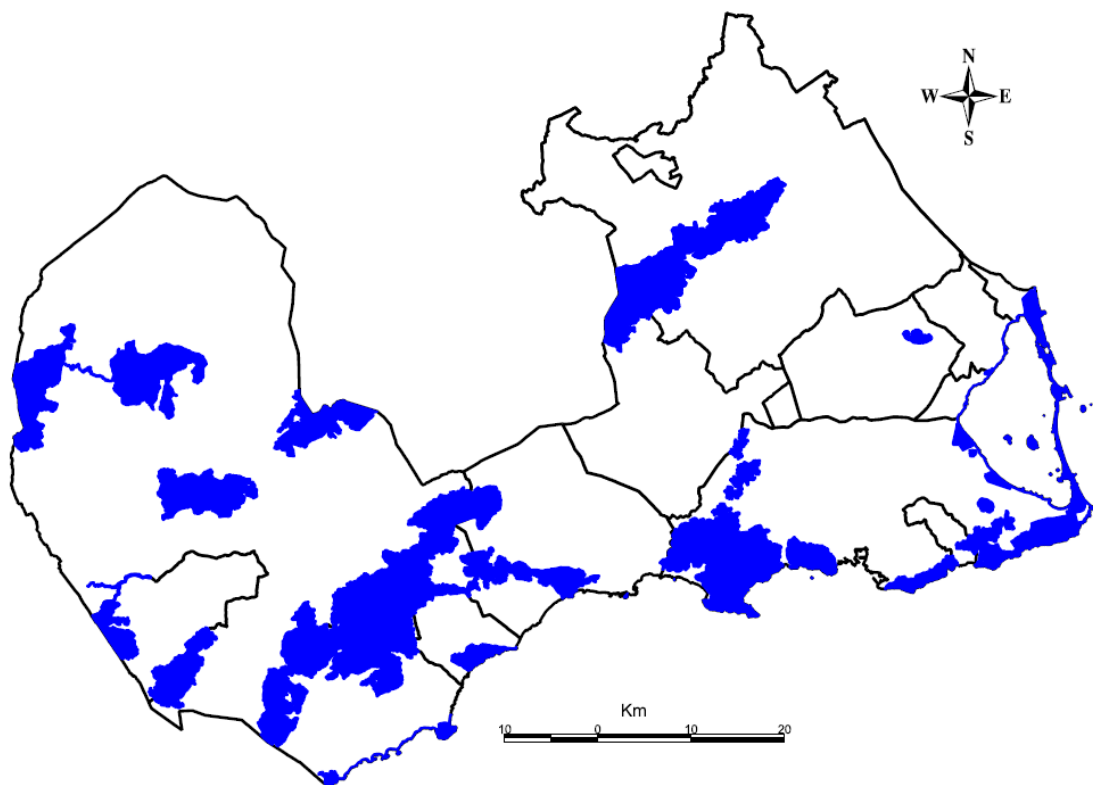


Fig. 6.10.- Capa temática de Lugares de Importancia Comunitaria (LICs)

6.4.2.7. Capa de Zonas de Especial Protección para Aves (ZEPAs)

La Red Ecológica Europea Natura 2000 no sólo engloba a los LICs, sino que también pertenece a dicha red las Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPA). Actualmente están declaradas 22 Zonas de Especial Protección para las Aves en la Región de Murcia de las cuales 10 están situadas en la zona objeto de estudio.

El marco legal que define a los LICs es el mismo que rige a las ZEPAs (Red Natura 2000, Directiva 92/43/CEE del Consejo, PGOU municipales, etc.), por ello los criterios descritos son semejantes en ambos casos.

Procediendo de forma semejante a lo desarrollado en los LICs , se obtendrá otra nueva capa temática de restricciones (ZEPAs) ya que, contendrá diversas zonas en las que resulta inviable implantar cualquier instalación de EERR (figura 6.11.).

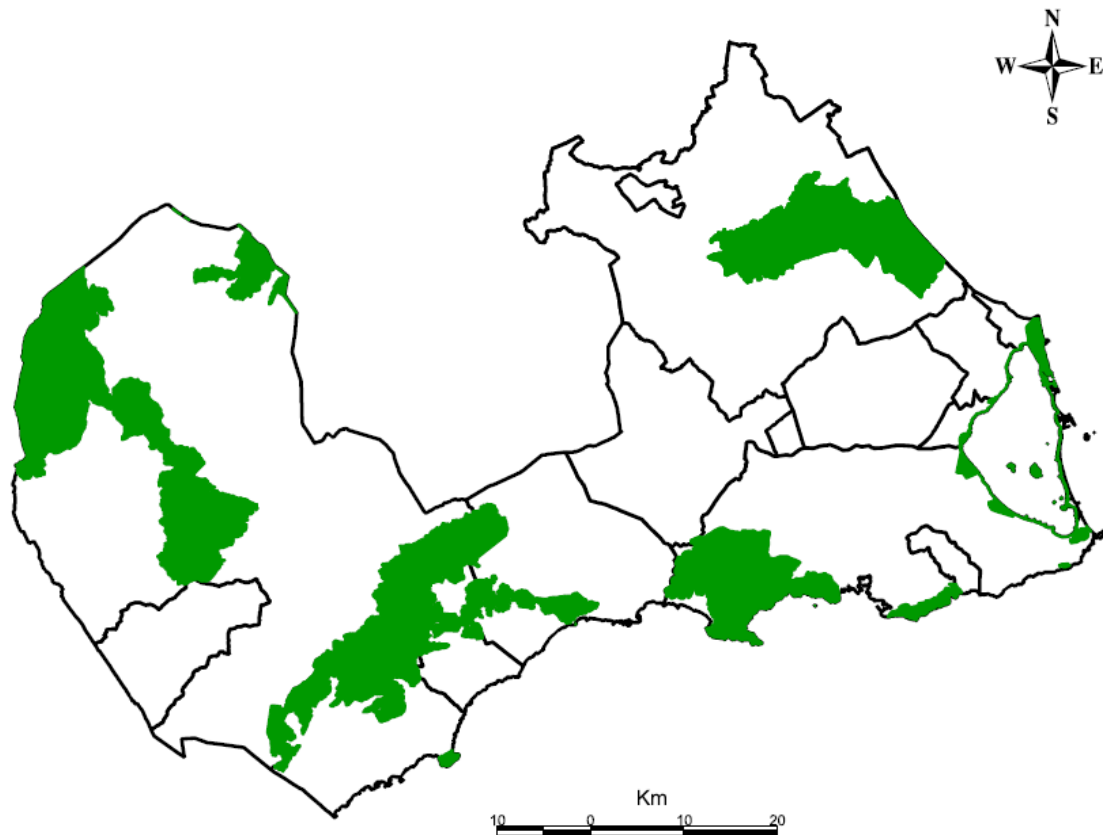


Fig. 6.11.- Capa temática de Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPAs)

6.5. Aplicación de las restricciones

El presente capítulo tiene como objetivo la selección de la superficie apta para implantar instalaciones de EERR. La zona que se ha planteado como ámbito de estudio corresponde con el litoral de la Región de Murcia el cual abarca los 13 municipios anteriormente indicados. Respecto a la superficie de la Región de Murcia (11.311,22 km²), el litoral de la Región de Murcia ocupa una superficie de 4.456,59 km².

Inicialmente se utilizará el software gvSIG para representar los criterios limitantes o restrictivos, es decir aquellos criterios que imposibilitan que en una determinada zona puedan implantarse una instalación de EERR. Los criterios que se han establecido son los indicados en el apartado 6.4.2. y a cada uno de los mismos le corresponderán una serie de capas, con las que se han impuesto las restricciones. Las capas utilizadas finalmente que definen los criterios restrictivos son las indicadas en la figura 6.12.



Fig. 6.12.- Diagrama de criterios restrictivos aplicados

Todas las restricciones anteriores están contenidas en capas que previamente se adecuaron y trataron en gvSIG. El proceso de adecuación que recibieron fue el necesario para limitarlas a la zona de estudio y, en los casos en que fue necesario, añadir zonas de protección, áreas de proximidad etc. Posteriormente y mediante las herramientas de cálculo del software, se aplicarán las restricciones con el objetivo de ir eliminando aquellas zonas que no son aptas para la implantación dejando únicamente la superficie factible para tal finalidad (figura 6.13.)

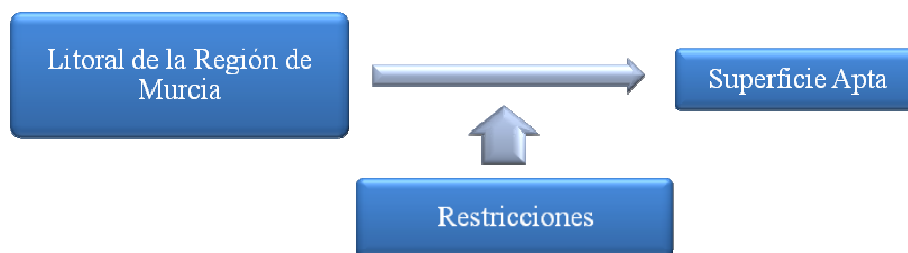


Fig. 6.13.- Diagrama de criterios restrictivos aplicados

Una vez introducidas las capas en formato vectorial se aplicará una herramienta del software gvSIG denominada “diferencia”, mediante dicho comando se irán eliminando las superficies ocupadas por los criterios restrictivos de forma que la superficie resultante será la óptima.

6.6. Introducción de la información catastral

El proceso llevado a cabo hasta el momento proporcionarían aquellas zonas en las que sería viable implantar una instalación de EERR, no obstante, desde el punto de vista de una posterior clasificación, resulta de gran utilidad el desglosamiento del suelo en parcelas según la Dirección General del Catastro con el objetivo de obtener la aptitud de cada parcela de forma individualizada.

En gvSIG existen diversas formas de poder abarcar el estudio por zonas, resulta posible trabajar con capas raster y a cada celda asignarle un paquete de datos (Arán Carrión, 2008). En la presente Tesis Doctoral se adoptará la decisión de delimitar las zonas por

parcelas y así, en lugar de trabajar con celdas iguales y equidistantes, se trabajará con parcelas.

Por tanto, para poder clasificar y enumerar la superficie restante mediante un criterio común se utilizará la clasificación realizada por la Dirección General del Catastro de la Región de Murcia la cual, divide la superficie de cualquier territorio en polígonos, parcelas y subparcelas para ello, se utilizará la capa temática de información catastral en formato vectorial del litoral de la Región de Murcia en la que se han indicado mediante distintos colores los municipios implicados (fig.6.14.).

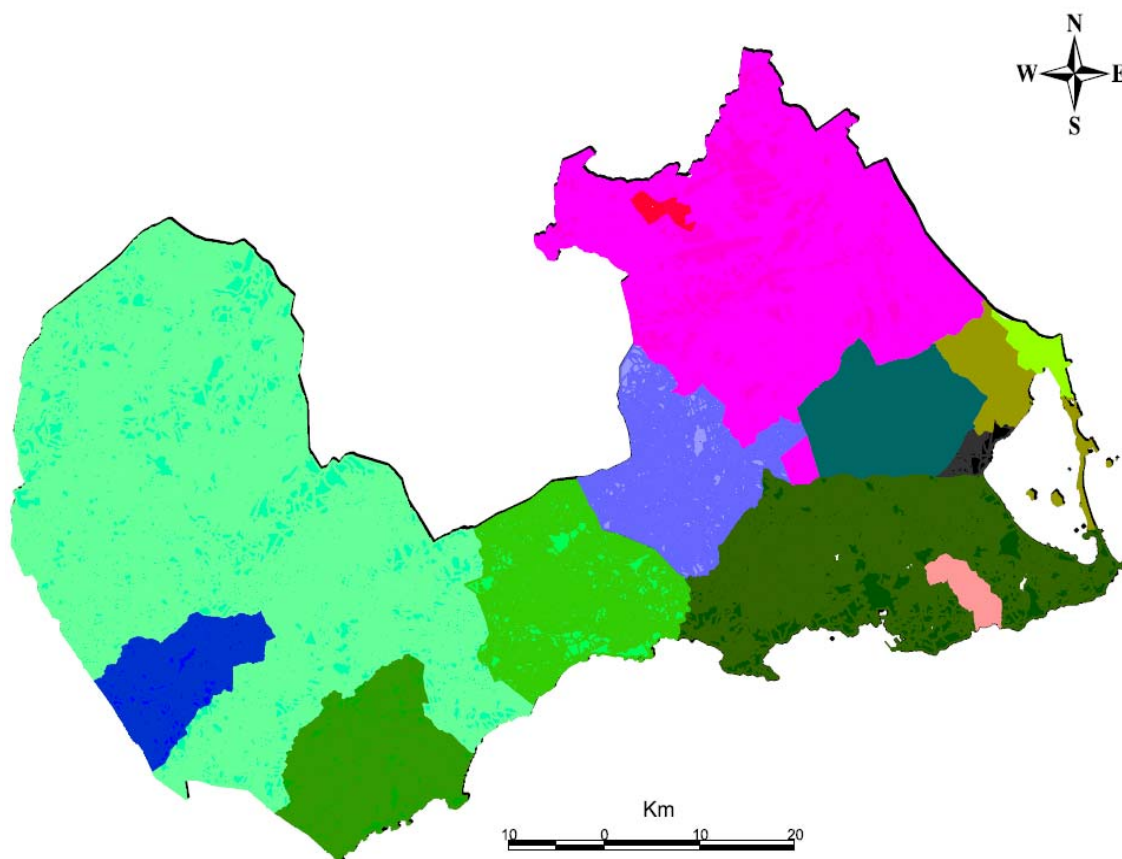


Fig. 6.14.- Capa temática de información catastral

El uso de una nueva capa temática más, servirá para establecer dos nuevas restricciones, la primera consistirá en descartar las parcelas en las que haya construido alguna edificación en su interior ya que, la información que proporciona dicha capa temática permite distinguir este tipo de parcelas del resto.



La segunda restricción corresponderá con la superficie mínima que deberá presentar cada parcela, ésta dependerá del tipo de tecnología de EERR que se vaya a implantar, por ello siguiendo las indicaciones comentadas en el capítulo II de la presente Tesis, se procederá a descartar aquellas parcelas cuya superficie mínima sea la indicada en la tabla 6.2.

<i>Tipo de EERR</i>	<i>Superficie mínima de la Parcela</i>
Planta de energía solar fotovoltaica (potencia instalada mínima 100 kWp)	300 m ²
Planta de energía solar termoeléctrica (potencia instalada mínima 100 kWp)	5.000 m ²
Parque eólico (Potencia instalada mínima 5 MW)	5.000 m ²

Tabla. 6.2.- Superficies mínimas en función del tipo de EERR

6.7. Superficies aptas obtenidas en función de la tecnología renovable

6.7.1. Energía solar fotovoltaica

La información proporcionada por la capa temática catastral además de indicar los polígonos, parcelas y subparcelas, permite conocer la superficie de cada parcela y si en la misma hay alguna edificación. Aunque para implantar un huerto solar fotovoltaico se puede partir de superficies relativamente pequeñas ($\approx 300 \text{ m}^2$), a consecuencia de la gran cantidad de información temática que se va a introducir posteriormente, para facilitar el cálculo con el software gvSIG se estimará que la superficie mínima de cada parcela será de valor 1000 m^2 . De igual modo resulta lógico considerar que aquellas parcelas que contengan alguna edificación serán las menos indicadas para albergar un huerto solar.

Por tanto, teniendo en cuenta todas las consideraciones arriba mencionadas y aplicando otras herramientas y comandos del software gvSIG (filtro y diferencia), se eliminarán aquellas parcelas que tengan alguna de las consideraciones indicadas (superficie inferior a 1000 m^2 o parcelas con edificaciones) y se obtendrá una nueva capa que contendrá la superficie óptima (clasificada en polígonos, parcelas y subparcelas) del Litoral de la

Región de Murcia para implantar huertos solares fotovoltaicos, en la figura 6.15. se observa mediante una ortofoto o capa tipo raster su distribución en el Litoral.

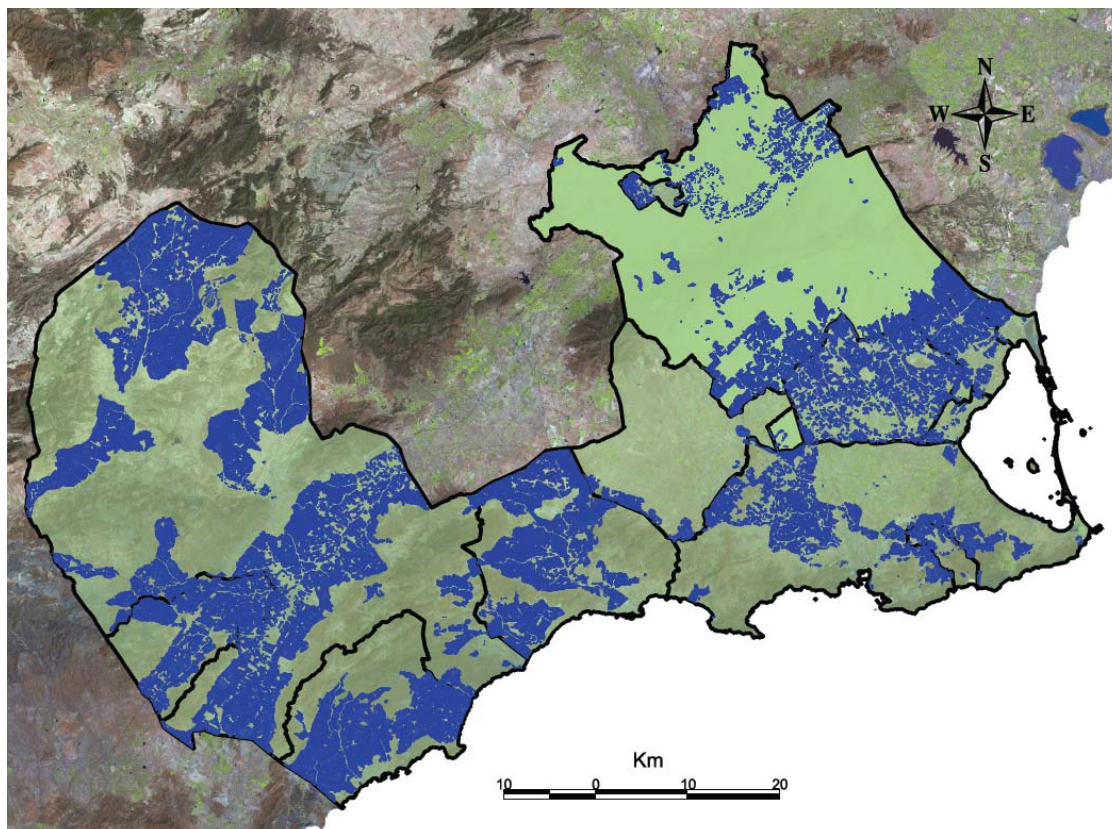


Fig. 6.15.- Superficie apta para implantar huertos solares fotovoltaicos

De la totalidad del territorio que abarca el litoral de la Región de Murcia (4.456,59 km²), un 21,25 % de dicha superficie será adecuada para implantar huertos solares fotovoltaicos, dicho porcentaje corresponde a 947,11 km².

6.7.2. Energía solar térmica de alta temperatura (termoeléctrica)

Las superficies aptas para implantar instalaciones de energía solar termoeléctrica se obtendrán mediante un procedimiento similar al seguido para instalaciones solares, la única diferencia entre ambas será la superficie mínima necesaria para implantar este tipo de instalaciones. Si en el caso de instalaciones solares fotovoltaicas se establecía la superficie de 1000 m² como punto de partida, para el caso de instalaciones termoeléctricas con vertido a red, la superficie mínima según los expertos debe ser



superior (5.000 m^2), ya que, este tipo de instalaciones necesitan un espacio mínimo para poder ser instaladas.

Teniendo en cuenta ambas consideraciones, se realizará un filtrado para eliminar aquellas parcelas que tengan alguna de las consideraciones indicadas (superficie inferior a 5000 m^2 o parcelas con edificaciones) y, aplicando de nuevo los comandos del software gvSIG se obtendrá una nueva capa que contendrá la superficie óptima del Litoral de la Región de Murcia para implantar instalaciones solares termoeléctricas (figura 6.16).

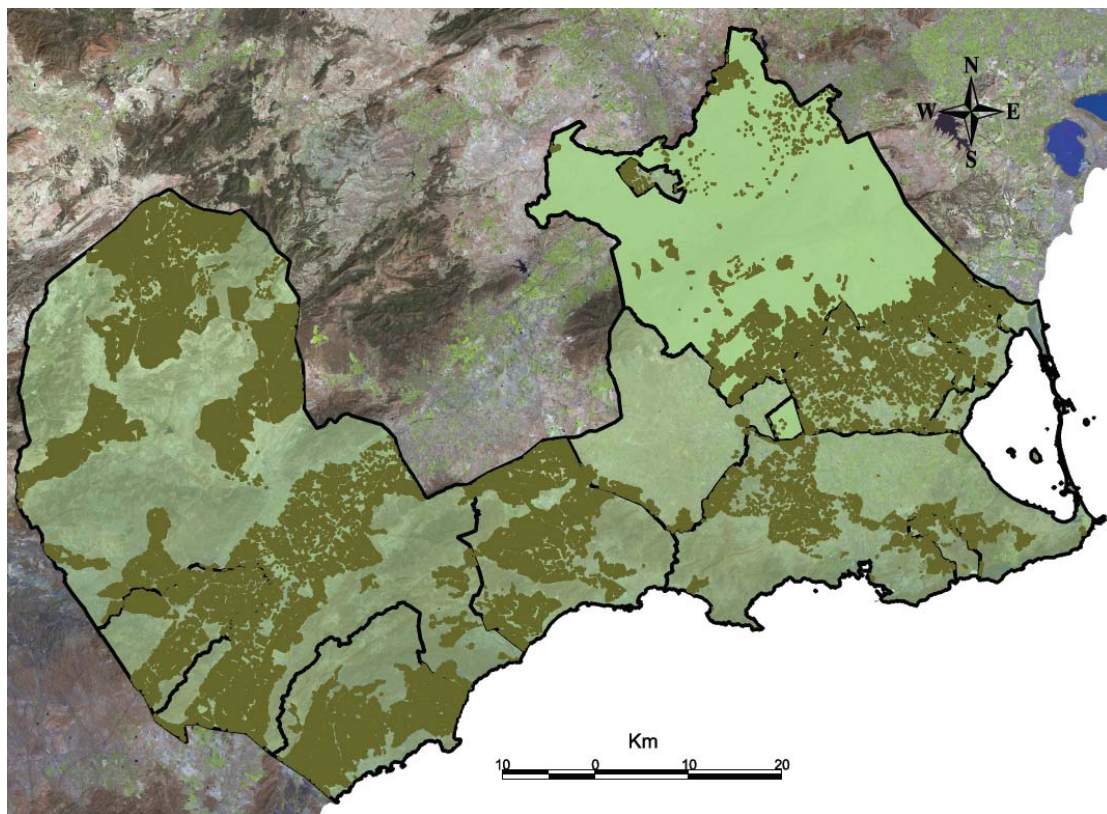


Fig. 6.16.- Superficie apta para implantar instalaciones solares termoeléctricas

En este caso, un 19,32 % de la superficie total del Litoral ($4.456,59 \text{ km}^2$) será adecuada para implantar instalaciones solares termoeléctricas, dicho porcentaje corresponde a $861,01 \text{ km}^2$.



6.7.3. Energía eólica

En el caso de parques eólicos el procedimiento a seguir es similar al que se ha seguido hasta el momento, no obstante resulta necesario tener en cuenta una restricción que para los casos de instalaciones solares se había descartado: los montes. A diferencia de instalaciones solares en las que terrenos con excesiva pendiente y masa forestal (como por ejemplo un monte) dificultan su implantación y les hace ser poco atractivos para su ejecución y posterior desarrollo, para el caso de parques eólicos, las cimas o cumbres de dichos terrenos (siempre y cuando hayan otros factores favorables como pendientes suaves, infraestructuras próximas, etc.) son bastante interesantes para implantar un parque eólico por lo que no resulta conveniente descartarlos. Por tanto, de las capas de restricciones anteriormente definidas que se habían introducido en el software gvSIG, para el caso de parques eólicos no se eliminarán las superficies ocupadas por montes.

Para el caso de implantación de parques eólicos cuya finalidad sea el vertido a la red de distribución, la superficie mínima para implantar al menos dos aerogeneradores debe ser próxima a 5.000 m² ya que, aunque ocupan puntualmente poco espacio, es necesario mantener determinadas distancias de separación entre los aerogeneradores y entre cualquier otra infraestructura cercana.

Teniendo en cuenta esta consideración, se añadirá la capa vectorial de montes al software gvSIG y se realizará un filtrado para eliminar aquellas parcelas cuya superficie sea inferior a 5.000 m², de modo similar a lo aplicado en instalaciones solares también se eliminarán aquellas que tengan alguna edificación. Aplicando de nuevo el comando diferencia con la capa de información catastral se obtendrá una nueva capa que contendrá la superficie óptima del Litoral de la Región de Murcia para implantar parques eólicos, en la figura 6.17 se observa mediante una ortofoto o capa tipo raster su distribución en el Litoral.

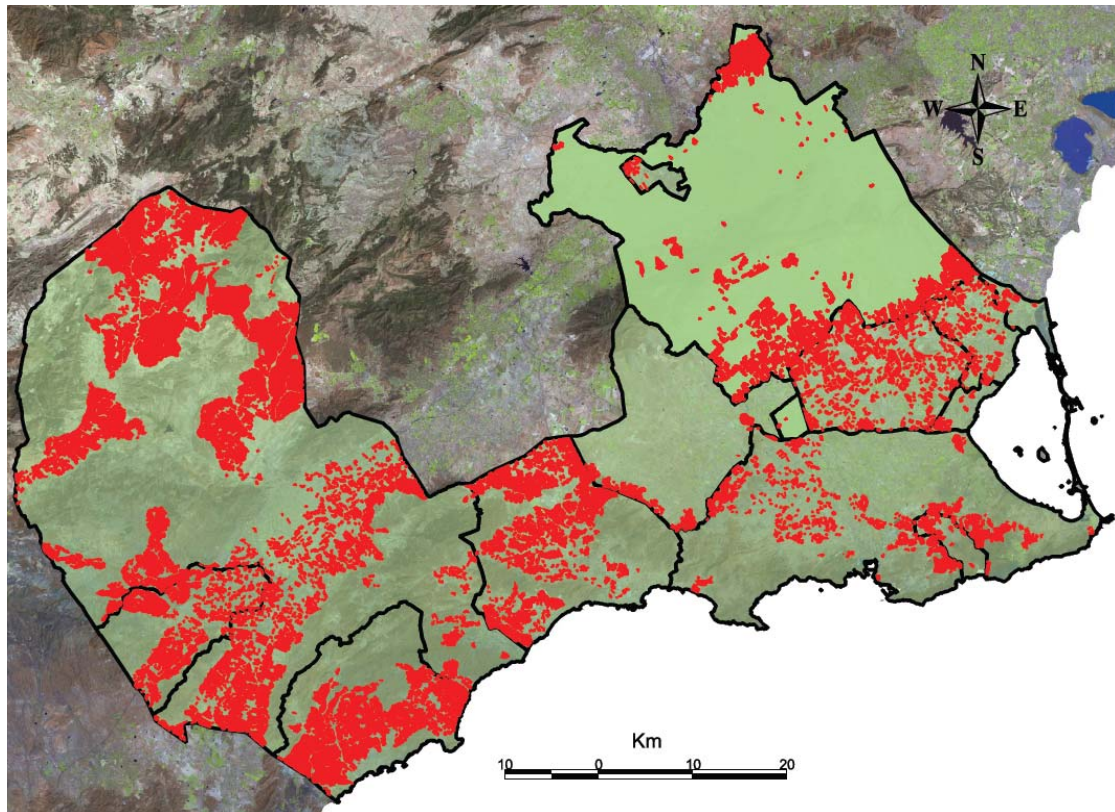


Fig. 6.17.- Superficie apta para implantar parques eólicos

De la totalidad del territorio que abarca el litoral de la Región de Murcia (4.456,59 km²), un 19,94 % de dicha superficie será adecuada para implantar parques eólicos, dicho porcentaje corresponde a 888,75 km².

6.8. Análisis de los resultados obtenidos

En el presente capítulo se ha comprobado que el litoral de la Región de Murcia es una zona óptima para implantar instalaciones solares fotovoltaicas, termoeléctricas y eólicas ya que, una vez que se ha considerado la totalidad de los criterios restrictivos o limitantes, las superficies aptas disponibles son elevadas. En la tabla 6.3. se muestran los porcentajes de superficies aptas respecto al total del Litoral de la Región de Murcia y para cada tecnología de EERR.



<i>Tipo de EERR a implantar</i>	<i>Superficies Aptas</i>	
	<i>(m²)</i>	<i>Respecto del total del litoral (%)</i>
Huertos solares fotovoltaicos	947,11	21,25
Instalaciones solares termoeléctricas	861,01	19,32
Parques eólicos	888,75	19,94

Tabla. 6.3.- Superficies aptas para implantar instalaciones de EERR en el litoral de la RM

Entre las diversas tecnologías estudiadas se observa que el mayor porcentaje se obtiene en instalaciones solares fotovoltaicas, en cierto modo dicho resultado es lógico ya que para implantar un huerto solar fotovoltaico con vertido a la red de distribución no se requiere una excesiva superficie y por lo tanto parcelas superiores a 1000 m² resultan óptimas.

Es de destacar que aunque para el caso de implantación de parques eólicos se ha añadido la capa de montes, las superficies óptimas para implantar instalaciones solares termoeléctricas y parques eólicos no presentan notables diferencias. Este hecho es debido a que aunque se ha añadido mayor superficie válida considerando los montes del Litoral, la mayor parte de éstos son Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPAs) y Lugares de Importancia Comunitaria (LICs), resultando ser por tanto zonas protegidas no aptas para implantar ningún tipo de instalación de EERR.

No obstante, este estudio no sólo ha servido para obtener las superficies aptas para implantar instalaciones de EERR, sino que ha permitido crear una base de datos que constituye un excelente punto de partida para evaluar la capacidad de acogida del Litoral de la Región de Murcia mediante la combinación de un Sistema de Información Geográfica con Sistemas de Ayuda a la Decisión del tipo Soft Computing (SIG-Soft Computing). Estudio que se desarrollará en el próximo capítulo de la presente Tesis Doctoral.



6.9. Referencias bibliográficas del Capítulo VI

Arán-Carrión, J., Espín-Estrella, A., Aznar-Dols, F., Zamorano-Toro, M., Rodríguez, M., y Ramos-Ridao, A., (2008). Environmental decision-support systems for evaluating the carrying capacity of land areas: Optimal site selection for grid-connected photovoltaic power plants. *Renewable and sustainable energy reviews*. 12. pp. 2358-2380.

Corrección de errores de la Ley 42/2007, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad. (2008). BOE nº 36. Gobierno de España, Madrid

Decreto 180/1987, de 26 noviembre 1987. Regulación de actuaciones arqueológicas. (1988). BORM nº 2. Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.

Decreto 102/2006, de 8 de junio, por el que se aprueban las Directrices y Plan de Ordenación Territorial del Suelo Industrial de la Región de Murcia. (2006). Consejería de Industria y Medio Ambiente. Dirección General de Ordenación del Territorio y Costas. Instituto de Fomento de la Región de Murcia. BORM nº 137, Comunidad Autónoma de la Región de Murcia

Decreto Legislativo 1/2005, de 10 de junio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley del Suelo de la Región de Murcia. (2005). BORM nº 282. Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.

Decisión del consejo 1999/800/CE, del 22 de octubre, relativa a la conclusión del Protocolo sobre las zonas especialmente protegidas y la diversidad biológica en el Mediterráneo, así como a la aceptación de los correspondientes anexos (Convenio de Barcelona). (1999). Diario Oficial de las Comunidades Europeas. L 322/1. Bruselas

Directiva 92/43/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1992, relativa a la Conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres. (1992). Diario Oficial nº L 206. pp. 0007 – 0050.

Directiva 2009/147/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de noviembre de 2009, relativa a la conservación de las aves silvestres. (2010). Diario Oficial de la Unión Europea. L 20/7. Bruselas.

Ley 16/1985 de 25 de Junio de Patrimonio Histórico Español. (1985). BOE nº 155, Gobierno de España, Madrid.

Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas. (1988). BOE nº 181. Gobierno de España, Madrid

Ley 25/1988, de 29 de julio, de Carreteras. (1988). BOE nº 182. Gobierno de España, Madrid



Ley 4/1990 de 11 de Abril de medidas de fomento del Patrimonio Histórico de la Región de Murcia. (1990). BOE nº 170. Gobierno de España, Madrid.

Ley 4/92 de 30 de Julio, de Ordenación y Protección del Territorio de la Región de Murcia. (1993). BOE nº 22. Gobierno de España, Madrid

Ley 3/1995, de 23 de marzo, de Vías Pecuarias. (1995). BOE nº 71. Gobierno de España, Madrid

Ley 7/95 de 21 de abril, de Fauna Silvestre de la Región de Murcia. (1995). BOE nº 131. Gobierno de España, Madrid

Ley 4/2007, de 16 de marzo, de Patrimonio Cultural de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.(2007). BORM nº 83. Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.

Ley 4/2009, de 14 de mayo, de Protección Ambiental Integrada. (2009). BORM nº 116. Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.

Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad. (2007). BOE nº 299. Gobierno de España. Madrid.

Real Decreto 1471/1989, de 1 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento General para Desarrollo y Ejecución de la Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas. (1989). BOE nº 297. Gobierno de España, Madrid

Voivontas, D., Assimacopoulos, D. y Mourelatos, A. (1998). Evaluation of renewable energy potential using a GIS decision support system. *Renewable Energy*. Vol. 13. Nº 3. pp 333-344.

CAPÍTULO VII

EVALUACIÓN DE EMPLAZAMIENTOS ÓPTIMOS PARA ALBERGAR INSTALACIONES DE ENERGÍAS RENOVABLES





“Si no conozco una cosa, la investigaré”.

Luis Pasteur

CAPÍTULO VII

EVALUACIÓN DE EMPLAZAMIENTOS ÓPTIMOS PARA ALBERGAR INSTALACIONES DE EERR

7.1. Definición del modelo de decisión

7.1.1. Definición del objetivo

El objetivo del presente capítulo consistirá en la evaluación de emplazamientos óptimos para implantar instalaciones de EERR en el litoral de la Región de Murcia, para ello, se deberá utilizar una regla de decisión que se adapte correctamente al problema planteado. Para la determinación del modelo de decisión, se tomará como referencia el diagrama de flujo propuesto por Barredo-Cano y Gómez-Delgado (2005) para problemas de planificación territorial (figura 7.1.).

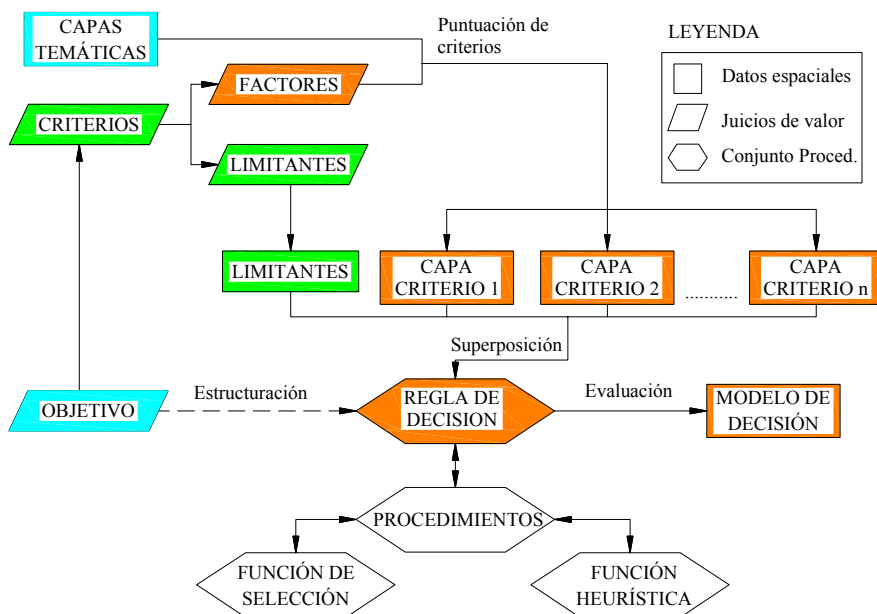


Fig. 7.1.- Sistema de integración entre SIG y Evaluación multicriterio (Barredo-Cano y Gómez-Delgado,2005)



En la figura anterior se observa en color verde lo desarrollado en el capítulo VI es decir, la selección de los criterios limitantes o restrictivos con la intención de obtener la superficie apta para implantar instalaciones de EERR, el color azul representa el objetivo a alcanzar mediante el uso de sistemas de ayuda a la decisión y los aspectos comunes (capas temáticas) y, finalmente, el color naranja muestra las fases que se realizarán en el presente capítulo el cual consistirá en el estudio de los factores que influyen en la capacidad de acogida de instalaciones de EERR en el litoral de la Región de Murcia.

7.1.2. Definición de criterios y desarrollo de la base de datos

Una vez definido el objetivo a alcanzar, será necesario conocer cuáles son los criterios que influyen (y en qué medida), en el problema de toma de decisión propuesto. Aunque se han realizado estudios precedentes que indican las características que deben reunir dichos criterios (Janke 2010; Van Haaren y Fthenakis 2011; Lee et al 2009), etc., el hecho de utilizar unos u otros dependerá principalmente de la zona de estudio. No obstante, resulta posible establecer unos criterios genéricos que posteriormente se podrán descomponer en criterios específicos o subcriterios los cuales dependerán de las características y naturaleza del territorio a analizar.

Por ello, siguiendo las directrices establecidas en Aran Carrión et al (2008), se establecerán cuatro grupos de criterios generales:

- Medioambientales
- Localización
- Orográficos
- Climatológicos

En la presente Tesis los criterios a considerar dependerán del tipo de tecnología de EERR a implantar, se establecerán criterios comunes, es decir aquellos que habrá que tener en cuenta con independencia del tipo de EERR y criterios específicos (dependientes del tipo tecnología a implantar).

Para la evaluación de emplazamientos de instalaciones de energía solar fotovoltaica y termoeléctrica, los criterios a considerar se han obtenido a partir de la bibliografía existente (Janke 2010; Gastli y Charabi 2010; Jo y Otanicar 2011; etc.) la cual ha sido consensuada con expertos en el campo de las EERR. En ambas tecnologías los criterios son coincidentes y, únicamente se diferenciarán en el peso de los mismos. La estructura jerárquica para este tipo de instalaciones es la mostrada indicada en la figura 7.2.

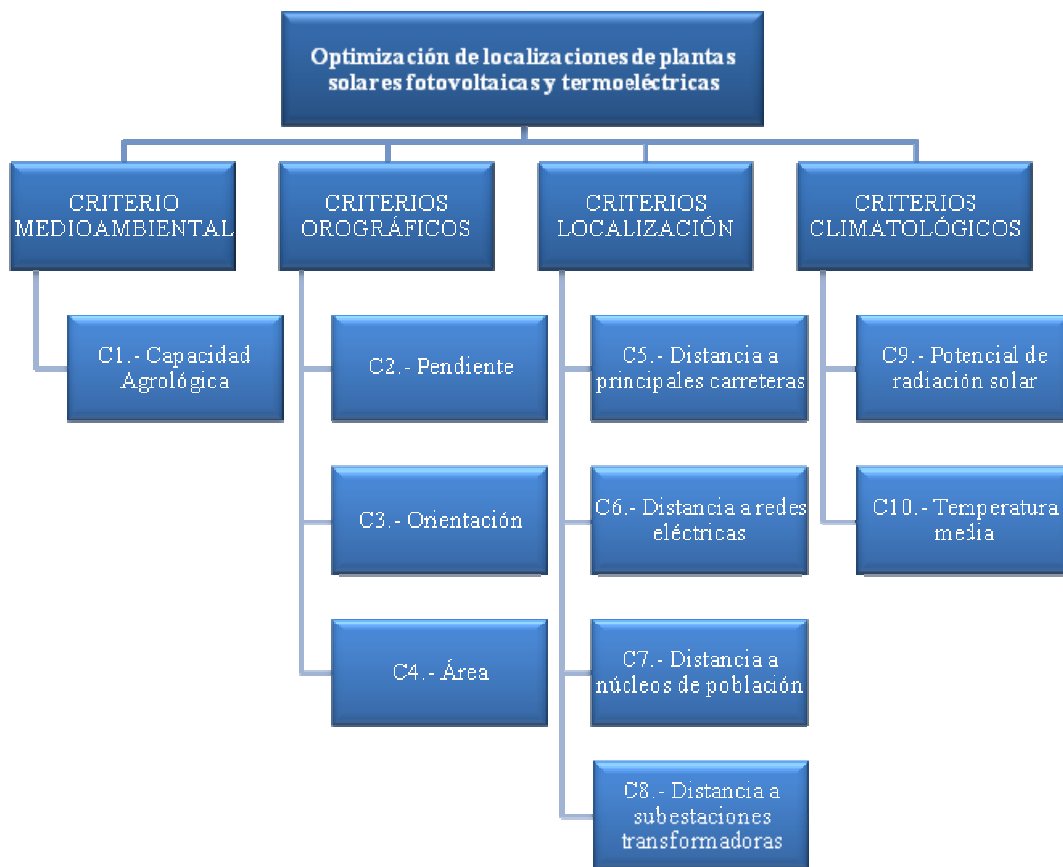


Fig. 7.2.- Jerarquía AHP para instalaciones solares fotovoltaicas y termoeléctricas

La optimización de localización de parques eólicos presenta una estructura similar a la reflejada para instalaciones solares, de igual modo los criterios han sido obtenidos a través de estudios realizados con anterioridad (Monteiro et al 1998; Janke 2010; Aydin et al 2010; Al-Yahyai et al 2012; Hansen 2005; etc.) y ratificados mediante expertos en este campo. Por ello, habrá criterios que sean coincidentes y otros nuevos a definir, la estructura jerárquica para este tipo de tecnología será de la forma mostrada en la figura 7.3.

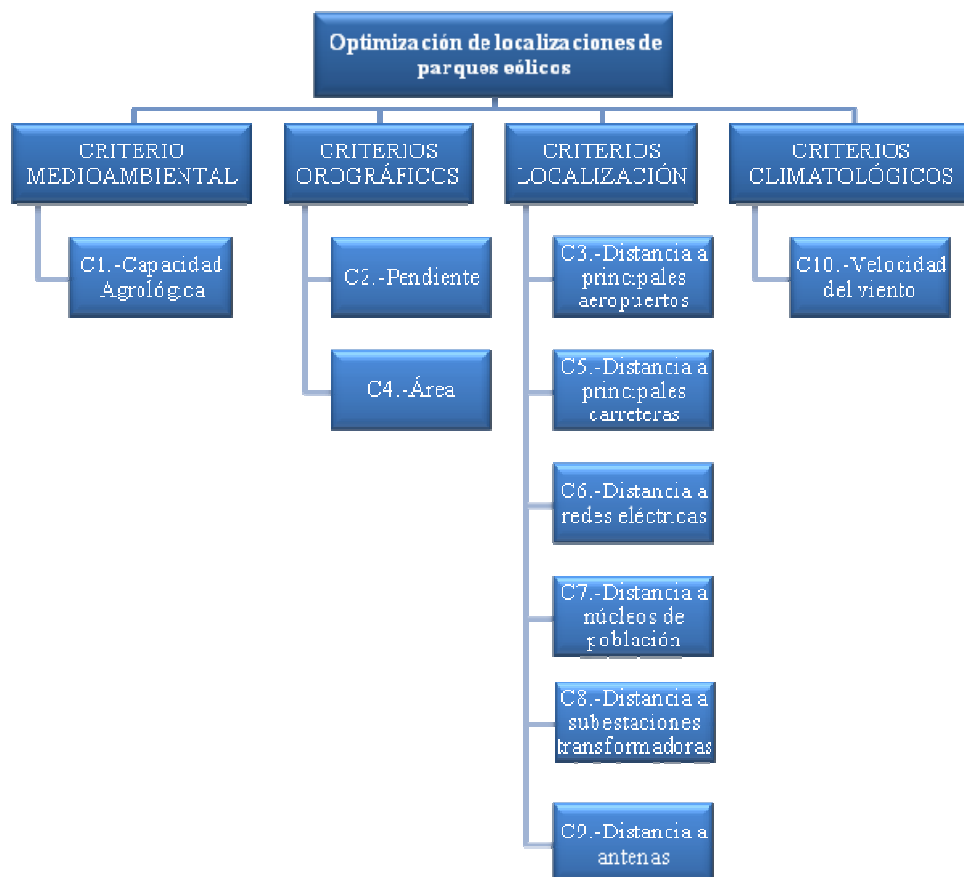


Fig. 7.3.- Jerarquía AHP para parques eólicos

Procediendo de manera análoga al desarrollo llevado a cabo en el capítulo anterior, se introducirán los criterios que influyan en el proceso de toma de decisiones en forma de capa temática en el software gvSIG con el objetivo de obtener una matriz de evaluación que refleje para cada alternativa a evaluar (para cada parcela catastral), la totalidad de criterios que le afectan. Por ello a continuación se describirán los distintos tipos de criterios y su representación en forma de capa temática.

7.1.2.1. Criterios medioambientales

Los criterios medioambientales permiten analizar el entorno que rodea a los seres vivos con el objetivo de minimizar cualquier impacto que se pueda causar (sobre la fauna, flora, paisaje, acústico, visual, etc.). En el caso objeto de estudio, los criterios medioambientales vendrán impuestos por la normativa vigente que regula dicha materia, normativa que fue analizada en el capítulo anterior y según la cual se



eliminaron aquellas zonas que pudieran ser susceptibles de generar cualquier posible daño ambiental.

No obstante, debido a que en el litoral de la Región de Murcia no todas las zonas aptas para implantar instalaciones de EERR presentan el mismo valor desde el punto de vista agrológico, coexistirán zonas en las que por las características del suelo, vegetación, etc., ofrezcan un alto valor para el desarrollo de la agricultura y otras en las que ocurra lo contrario, por ello el único criterio medioambiental que se tendrá en cuenta será el denominado *Capacidad Agrológica* que divide al terreno en clases agrológicas según la definición proporcionada por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (USSCS, 1996), en la cual se representan las clases de capacidad agrológica del suelo en una escala de I a VIII de forma que la clase I es aquella que presenta mayor capacidad para el desarrollo de cultivos agrícolas y la clase VIII presenta la peor capacidad agrológica.

Por las propias características que definen el subcriterio capacidad agrológica, se vislumbra que éste será común para cualquier instalación de EERR que se desee implantar.

Introduciendo la capa temática de capacidad agrológica (proporcionada por la Dirección general del Catastro de la Región de Murcia) en gvSIG y aplicando las herramientas del mismo para delimitar la superficie al litoral de la Región de Murcia, se obtiene la figura 7.4.

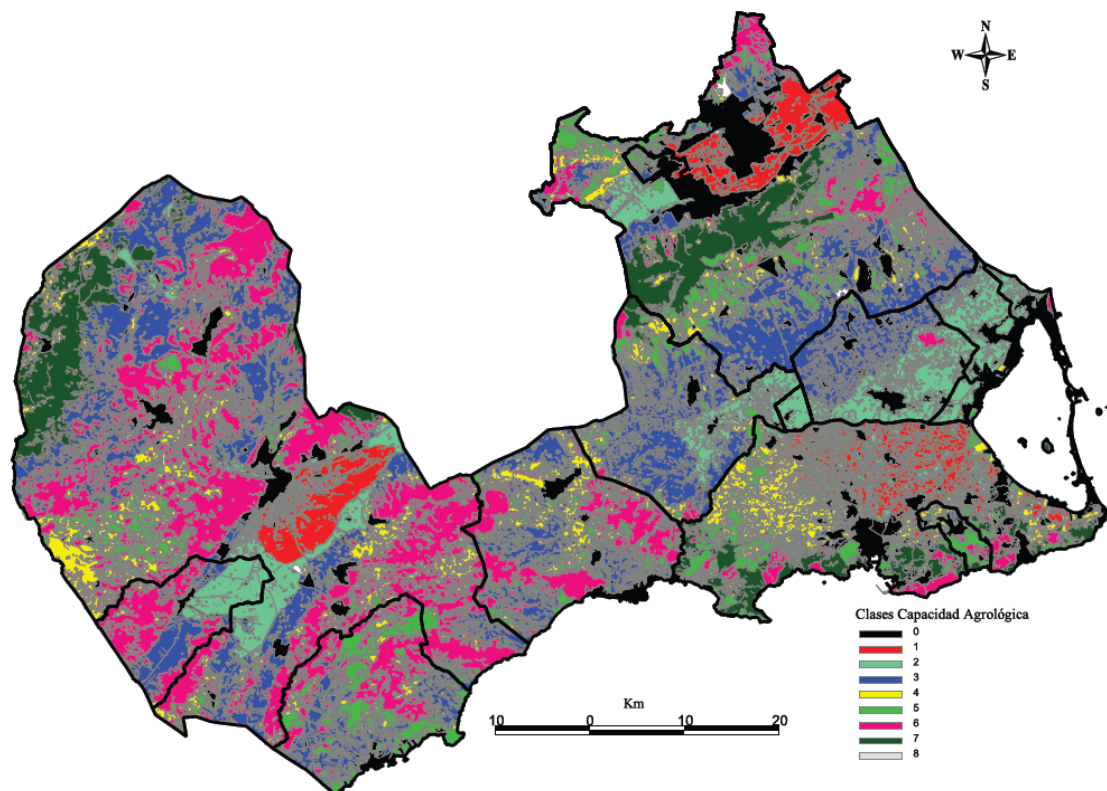


Fig. 7.4.- Capacidad Agrológica del litoral de la Región de Murcia

En la anterior figura se aprecia una nueva clase de capacidad agrológica (clase 0), realmente dicha clase no corresponde con ninguna valoración del terreno respecto a si es más o menos apto para el desarrollo de la agricultura, la clase 0 muestra los núcleos de población cuya superficie ocupada fue descartada en el capítulo anterior por tratarse de un criterio restrictivo (terrenos no aptos para implantar instalaciones de EERR).

7.1.2.2. Criterios orográficos

Otro grupo de factores a tener en cuenta estará formado por aquellos que definen las características geomorfológicas del terreno, al igual que ocurría con los criterios de localización, habrá criterios orográficos comunes para las instalaciones de EERR a estudio y, otros en cambio serán dependientes del tipo de tecnología a implantar.

La morfología de cada parcela puede limitar la capacidad de acogida de ésta, por ello se deben evitar terrenos con elevadas pendientes puesto que habría un costo excesivo en la

ejecución de la instalación pudiendo llegar a hacerla inviable. A consecuencia de ello se definirá un nuevo criterio denominado *pendientes* que será incorporado a gvSIG en forma de capa temática (figura 7.5) que será obtenida a través del servidor Web Coverage Service (WCS) del proyecto IDEE (Infraestructura de Datos Espaciales de España).

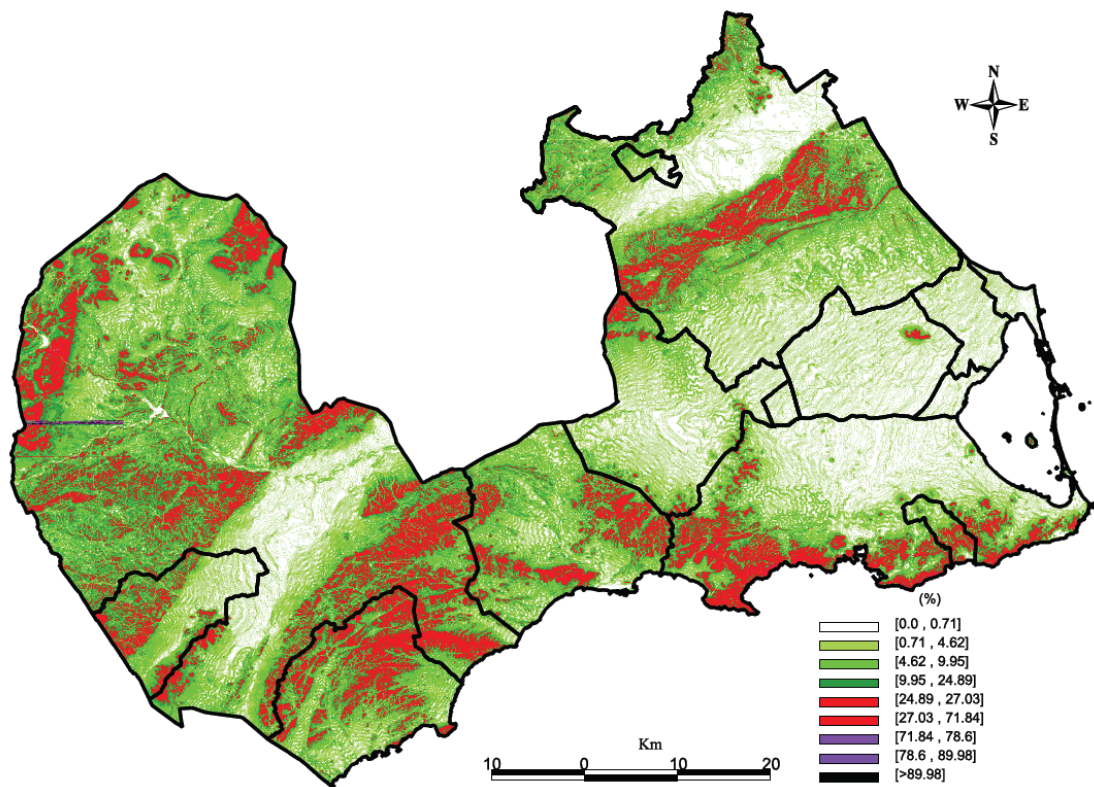


Fig. 7.5.- Pendientes del litoral de la Región de Murcia

Habrà que considerar otros criterios orogràficos tales como el *àrea* de cada parcela y la *orientaci3n del terreno* que son dependientes del tipo de tecnologìa. En el caso del àrea, cada alternativa a evaluar (cada parcela) ocuparà una determinada superficie de forma que parcelas con mayor superficie podràn albergar instalaciones de mayor tamaõ permitiendo aumentar por tanto la potencia instalada. Dicha superficie ha sido calculada en el capìtulo anterior mediante el proceso de obtenci3n de superficies aptas para implantar instalaciones solares fotovoltaicas, termoelèctricas y parques e3licos. (figuras 6.15/16/17).

La orientación del terreno es un criterio orográfico dependiente exclusivamente de instalaciones solares fotovoltaicas, ya que si un terreno dispone de una orientación adecuada, aumentará la eficiencia de la instalación e incluso puede favorecer la ejecución de la misma disminuyendo su coste. De forma análoga a la capa de pendientes, la capa temática de orientación del litoral (figura 7.6.) ha sido obtenida a través del IDEE mediante el servidor WCS.

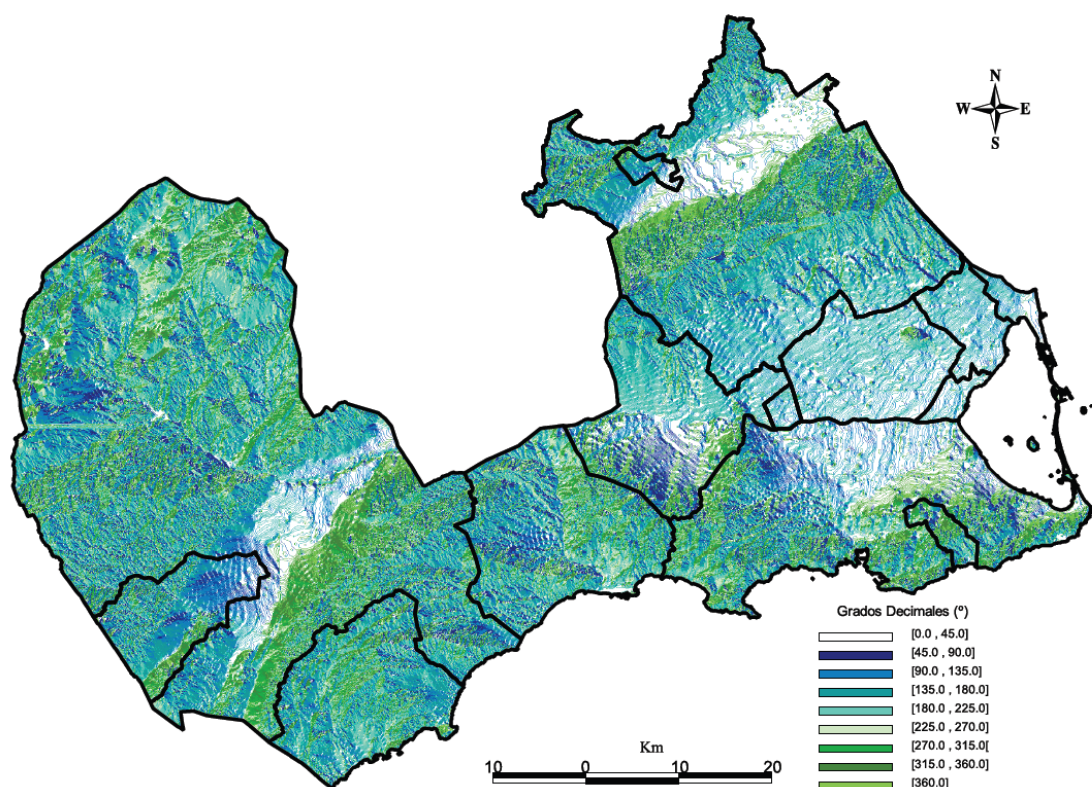


Fig. 7.6.- Orientación del terreno en el litoral de la Región de Murcia

7.1.2.3. Criterios de localización

Resulta muy importante que se realice una correcta evaluación de la ubicación pues ésta va a influir muy fuertemente en la viabilidad o no de la instalación. Habrá una serie de criterios comunes de localización para las instalaciones de EERR objeto del presente estudio, tales criterios comunes estarán fundamentados por un lado en una correcta ubicación y accesibilidad, y por otro en la proximidad con las infraestructuras existentes



que permitan el vertido a red de la energía eléctrica generada. Los criterios de localización comunes serán los siguientes:

- Distancia a principales carreteras
- Distancia a redes eléctricas
- Distancia a subestaciones transformadoras
- Distancia a núcleos de población

A continuación se procederá a su descripción de forma breve con la finalidad de argumentar su elección.

Resulta necesario evaluar la distancia a las principales vías de comunicación de la zona ya que, para implantar cualquier instalación de EERR se debe garantizar un acceso al emplazamiento elegido y, el criterio denominado *distancia a principales carreteras* proporciona la posibilidad de analizar los emplazamientos en función a la cercanía o lejanía con la red viaria existente. Introduciendo la capa temática (figura 7.7.), utilizada en el capítulo anterior, que representa las principales carreteras en el litoral de la Región de Murcia en gvSIG y, ejecutando las herramientas y comandos del software se podrá obtener la distancia de cada una de las alternativas (las distintas parcelas clasificadas según la información catastral) a la red viaria existente.



Fig. 7.7.- Principales carreteras en el litoral de la Región de Murcia

Debido a que las instalaciones de EERR evaluadas en la presente Tesis verterán la energía eléctrica generada a la red existente, requerirán tener, en las proximidades de sus emplazamientos, redes eléctricas en las que poder llevar a cabo el vertido, a consecuencia de ello se definirá un nuevo criterio denominado *distancia a redes eléctricas*. Por tanto, introduciendo la capa temática de redes de distribución existentes en gvSIG (proporcionada por la compañía suministradora Iberdrola Distribución Eléctrica, S.A.U.) cuya forma es la mostrada en la figura 7.8 y, aplicando las diversas herramientas y comandos del software se podrá obtener la distancia de cada una de las alternativas a la red eléctrica existente.

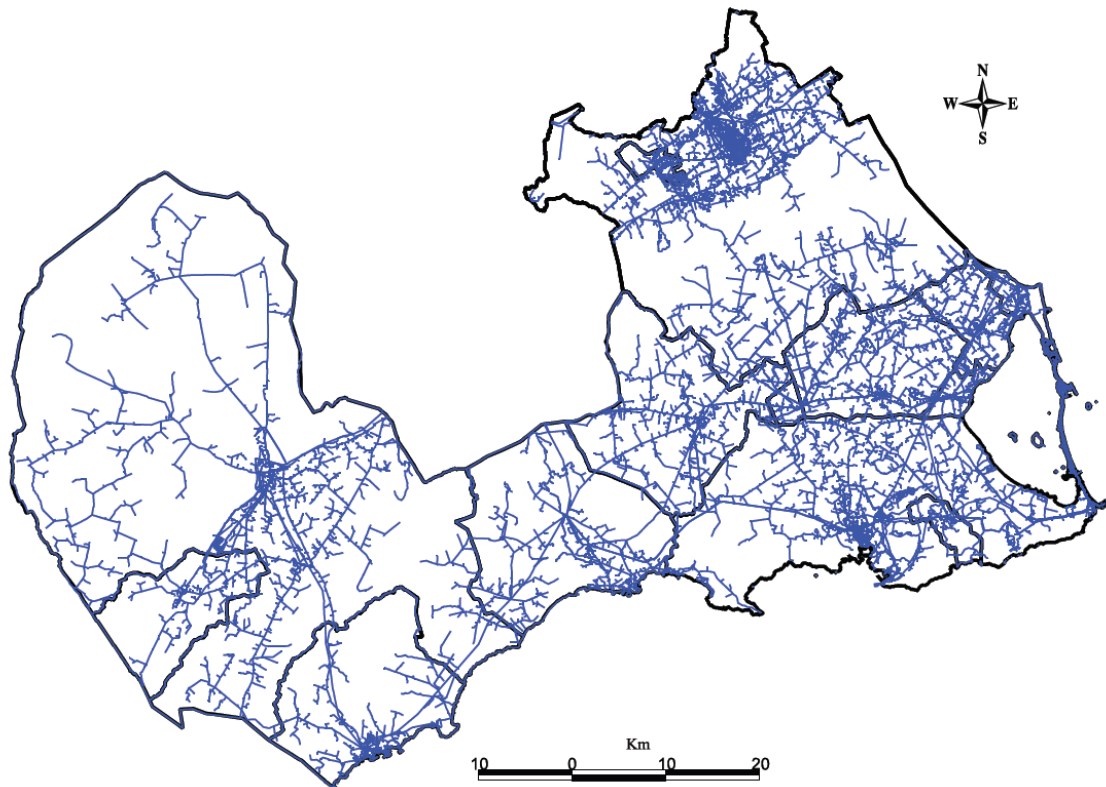


Fig. 7.8.- Red eléctrica existente en el litoral de la Región de Murcia

En algunos de los posibles emplazamientos a evaluar podría llegarse a la situación que, por la saturación de la red eléctrica existente, no pueda realizarse el vertido de forma directa a la red y se requiera partir del origen de la misma es decir, de las diversas subestaciones transformadoras distribuidas en el Litoral. Por ello conviene definir un nuevo criterio denominado *distancia a subestaciones transformadoras*. Al igual que ocurría con la capa temática de red eléctrica existente, la ubicación de las subestaciones en el litoral fue proporcionada por la compañía suministradora de la energía Iberdrola Distribución Eléctrica, S.A.U. (figura 7.9.). Ejecutando los diversos comandos de gvSIG se podrá obtener la distancia de cada una de las alternativas a las subestaciones transformadoras de la energía.

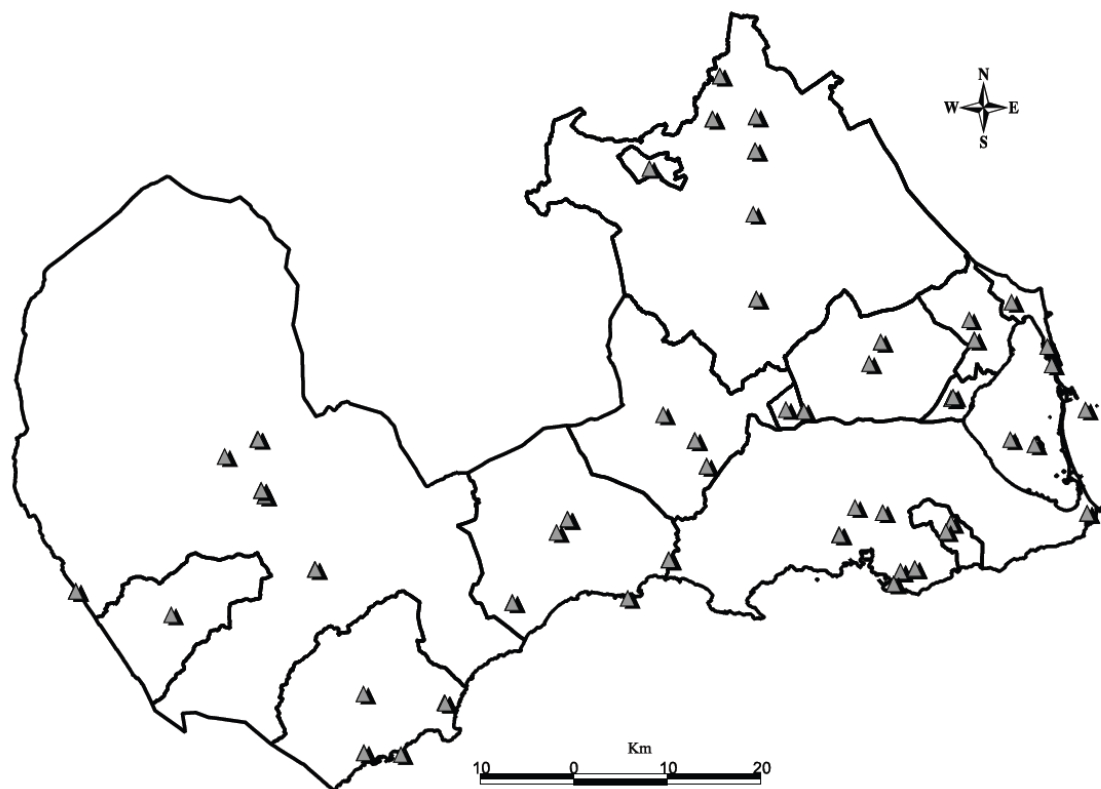


Fig. 7.9.- Subestaciones transformadoras en el litoral de la Región de Murcia

Aunque implantar una instalación de EERR en las proximidades de un núcleo de población (siempre y cuando se cumplan las normativas vigentes), en principio no parece generar ningún perjuicio a corto plazo, si se considera que este tipo de instalaciones requieren un plan de viabilidad y rentabilidad a largo plazo (no menos de 25 años), resultará conveniente separarlas de tales núcleos de población para evitar ocasionar graves perjuicios futuros que afecten tanto a la población (impacto acústico, visual, etc.) como a la propia instalación (altos niveles de polución que provoquen disminución de rendimiento, etc.) . Por tanto, se definirá un nuevo criterio denominado ***distancias a núcleos de población*** que será introducido en el software en forma de capa temática (figura. 7.10.), capa clasificada según los distintos tipos de clases de suelo urbano que se obtendrá a partir de la información temática analizada en el capítulo anterior. Mediante los comandos de gvSIG se podrá obtener la distancia de cada una de las alternativas (las parcelas catastrales) a los núcleos de población.

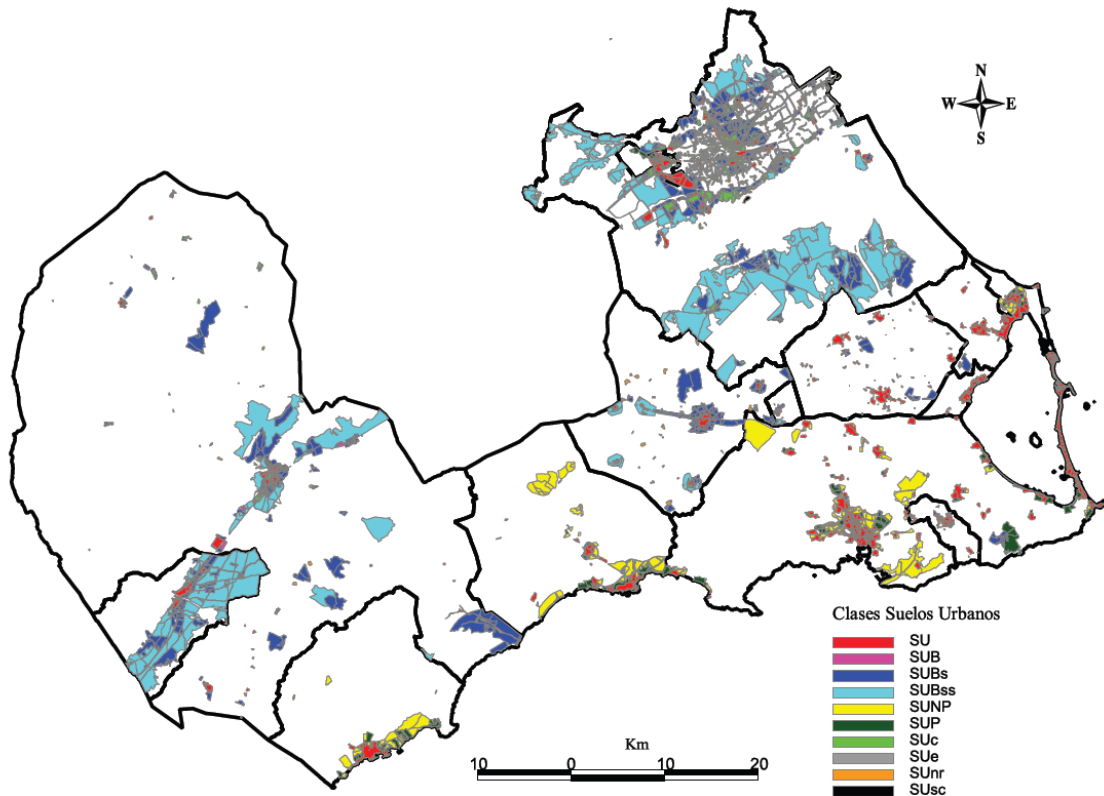


Fig. 7.10.- Núcleos de población en el litoral de la Región de Murcia

Los criterios de localización definidos hasta el momento, corresponden a criterios comunes que habrá que evaluar para todos los tipos de instalaciones de EERR objeto de estudio. No obstante, para evaluar los emplazamientos óptimos de parques eólicos, resulta necesario considerar dos criterios más:

- *Distancia a principales aeropuertos*
- *Distancia a infraestructuras de telecomunicaciones*

El hecho de considerar como criterio la distancia a los principales aeropuertos se debe a que los aerogeneradores de los parques eólicos son elementos situados a elevadas alturas y, la implantación de un parque eólico en las inmediaciones de un aeropuerto, puede acarrear limitaciones futuras de expansión tanto del propio parque eólico como de las instalaciones aeroportuarias (Andrew et al 2011). De igual modo ocurre con las infraestructuras de telecomunicaciones, según Hansen, H.S. (2005) se deberá tener en

cuenta al proyectar la implantación de un parque eólico la distancia a infraestructuras de telecomunicaciones existentes tales como repetidores de radio, etc.

En la figura 7.11. se observa la capa temática que indica la ubicación de los aeropuertos existentes y la situación de las distintas infraestructuras de telecomunicaciones en el litoral de la Región de Murcia, mediante gvSIG se obtendrá la distancia de las alternativas a evaluar tanto a aeropuertos como a antenas repetidoras.

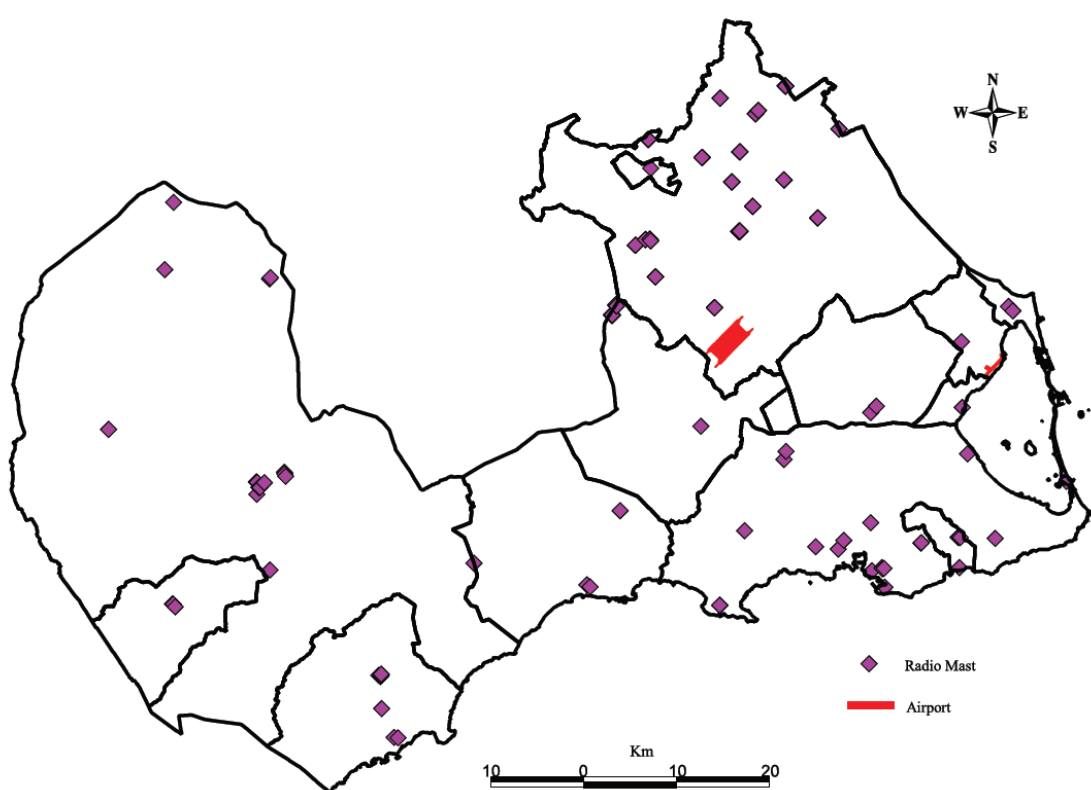


Fig. 7.11.- Aeropuertos e infraestructuras de telecomunicaciones en el litoral de la Región de Murcia

7.1.2.4. Criterios climatológicos

Aunque se definan en último lugar, no por ello resultarán menos importantes los criterios climatológicos, éstos constituyen el conjunto de las condiciones propias de un determinado clima y por tanto influirán en la evaluación de las alternativas que serán objeto de estudio.



En instalaciones solares fotovoltaicas y termoeléctricas, los criterios climatológicos por excelencia serán la *temperatura media* y el *potencial de radiación solar*, aunque en el caso de la zona de estudio, estos valores puede que no influyan demasiado en la evaluación (a consecuencia de las elevadas temperaturas y radiaciones que se alcanzan en la mayor parte del territorio de la Región de Murcia), serán considerados inicialmente y en su posterior evaluación se analizará si su influencia es significativa. La información temática (figuras 7.12 y 7.13) ha sido obtenida a través del Atlas Climático Digital de la Península Ibérica (Ninyerola et al, 2005).

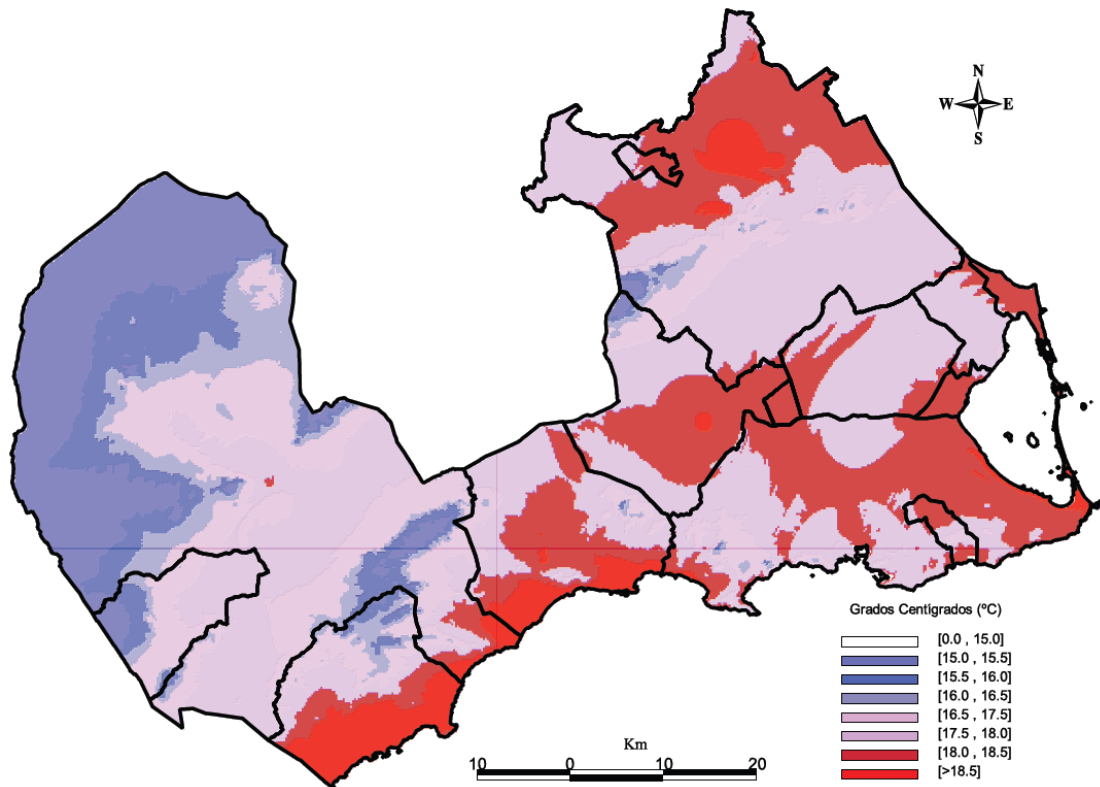


Fig. 7.12.- Temperatura media anual en el litoral de la Región de Murcia

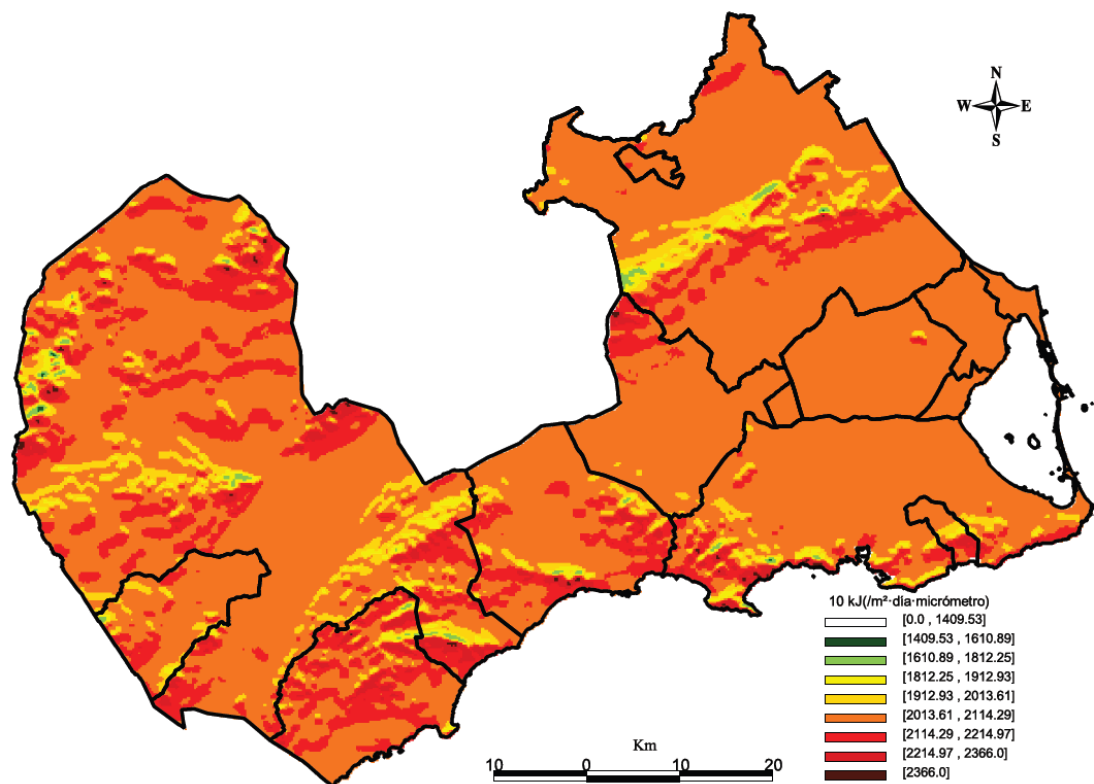


Fig. 7.13.- Potencial de radiación solar en el litoral de la Región de Murcia

Un requisito indispensable para poder implantar parques eólicos será la velocidad del viento ya que, si un emplazamiento no reúne las condiciones mínimas para que pueda funcionar un aerogenerador, habrá que descartarlo. Por ello se definirá un nuevo criterio climatológico denominado *velocidad de viento*. La información temática en este caso (figura 7.14), ha sido proporcionada a través del Estudio del recurso eólico y elaboración del mapa eólico de España, llevado a cabo por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE, 2010).

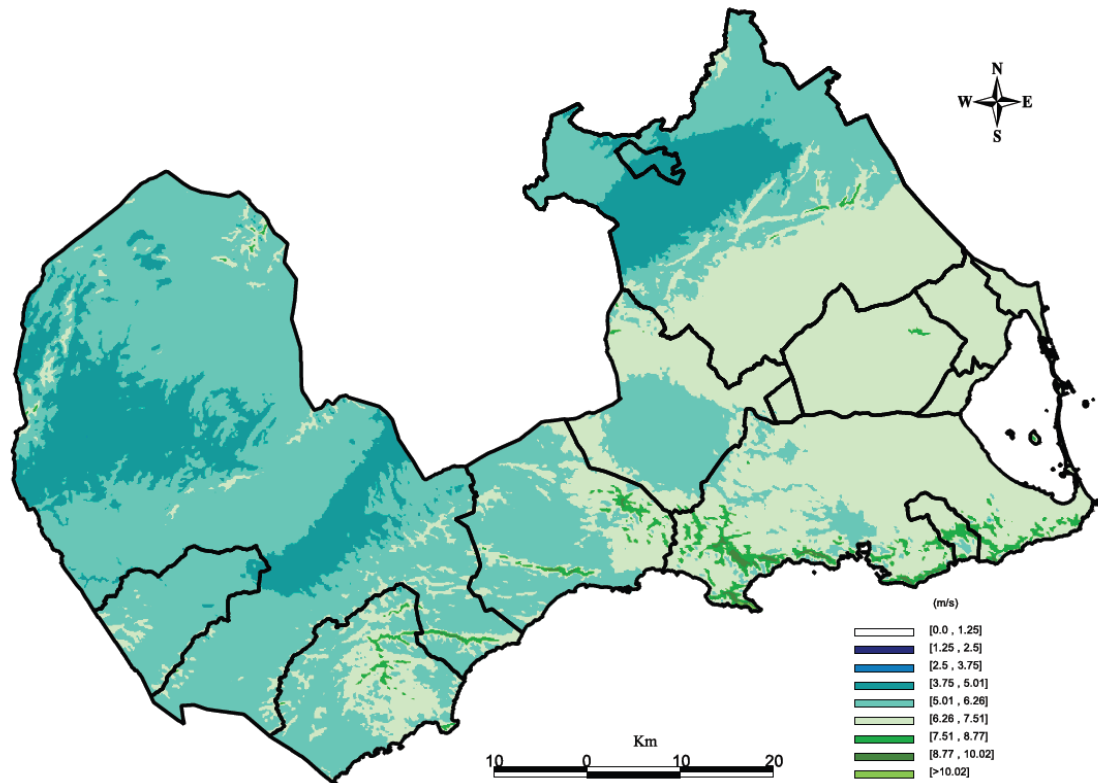


Fig. 7.14.- Velocidad del viento en el litoral de la Región de Murcia

Queda patente en lo anteriormente expuesto la gran cantidad de criterios que inciden en la elección de una ubicación ideal para una instalación solar fotovoltaica, termoeléctrica o un parque eólico, este hecho hace tremendamente complejo decidir una ubicación por lo que se hace necesario acudir a herramientas de ayuda a la decisión.

Mediante el software gvSIG, se procederá a continuación a aglutinar los criterios que influyen en la elección de emplazamientos de cada una de las tecnologías en una única capa temática con el objetivo de, generar una matriz de decisión en la que estén reflejados por un lado la totalidad de alternativas objeto de evaluación y por otro, los valores de los criterios que influyen en la decisión.

7.2. Construcción de la capa temática con los factores agregados

En el capítulo anterior se obtuvo una capa temática por tecnología renovable (energía solar fotovoltaica, termoeléctrica y energía eólica) que mostraba las superficies aptas

para implantar instalaciones de tales características, dichas superficies estaban distribuidas, en función a la información catastral (polígonos, parcelas y subparcelas catastrales). Partiendo de dicha capa e introduciendo en gvSIG los criterios que influyen en la decisión en función del tipo de instalación de EERR a estudio, se obtendrán tres nuevas capas temáticas que mostrarán la totalidad de información necesaria para poder llevar a cabo las técnicas de ayuda a la decisión, es decir, por un lado las alternativas que serán evaluadas (parcelas y subparcelas catastrales) y por otro los valores de los criterios vistos con anterioridad (según la EERR a implantar) para cada una de dichas alternativas.

A modo de ejemplo se muestra en la figura 7.15 los valores de tales criterios para una parcela cualquiera a evaluar en la búsqueda de emplazamientos óptimos de instalaciones solares fotovoltaicas.

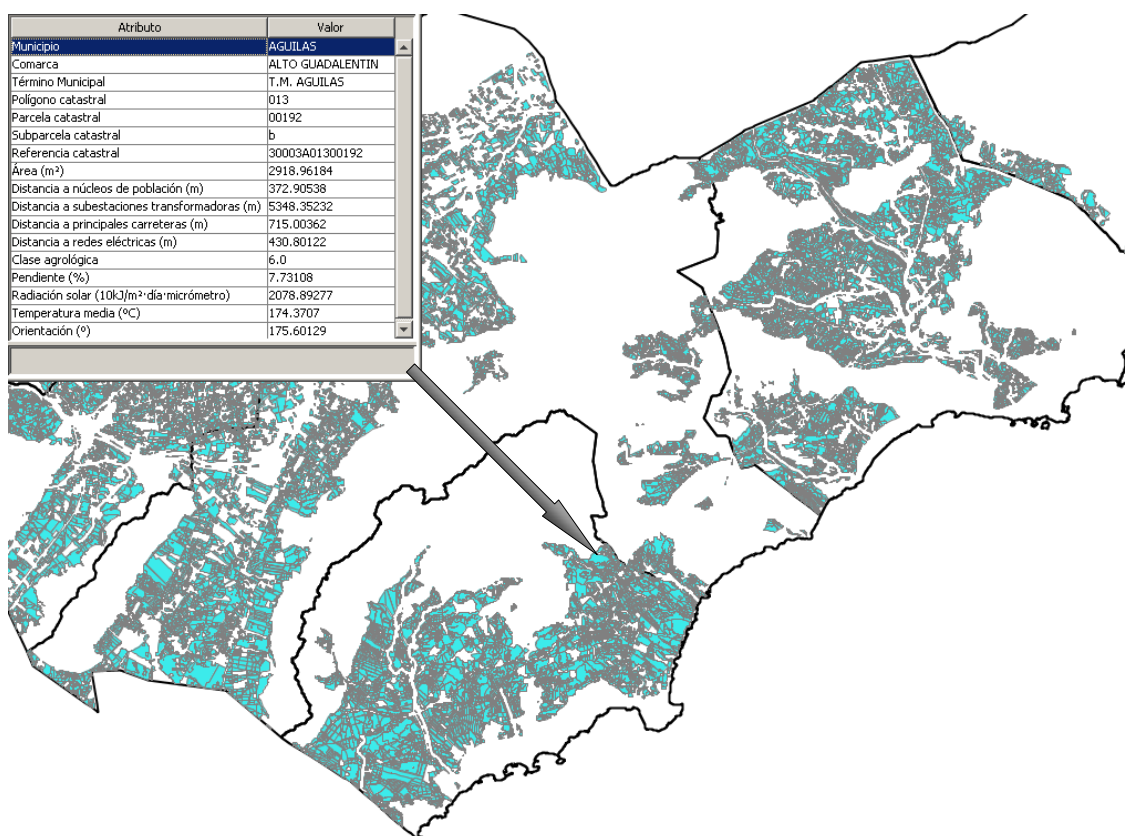


Fig. 7.15.- Captura gvSIG con información catastral y valores de criterios en una parcela dada



De igual modo el software proporcionará una tabla (según el modelo de base de datos relacional) denominada tabla de atributos que mostrará la información temática representada en filas y columnas de forma que las filas (o registros) constituirán los objetos geográficos que en este caso serán las alternativas a evaluar (parcelas y subparcelas) y, las columnas (o campos) definirán los denominados atributos o variables temáticas (información catastral y criterios). En este modelo, todos los campos se hallan en el mismo nivel (no hay relaciones jerárquicas), facilitando de este modo las operaciones entre ellos y permitiendo crear nuevas tablas.

Por ejemplo, llevando a cabo una captura de pantalla de gvSIG (fig. 7.16), se observa parte de la tabla de atributos que proporciona el software con el objetivo de posteriormente evaluar las diferentes alternativas para el caso de instalaciones solares fotovoltaicas en las que las dos primeras columnas constituyen las alternativas a evaluar (parcelas y subparcelas) y las diez restantes identifican los valores que presentan los criterios para cada una de dichas alternativas.

Parcela	Subparcela	Area	Dist_Núcleos_P	Dist_Subst_Trans	Dist_Carreteras	Dist_Reddes_E	C_Agrológica	Pendiente	Radiación	Temperatura	Orientación
00336	b	1572.52...	2137.35385	3964.99618	25.36076	451.31687	3.0	2.68034	2073.67611	176.80322	71.56505
00336	c	1766.7932	2168.80229	4061.71773	35.75224	453.66701	1.5	8.23721	2059.7012	176.62276	57.99462
00336	f	2139.86...	2153.33759	4021.42259	24.58861	479.02167	2.75	3.45946	2040.88305	176.77253	78.69007
00222	e	3353.78...	1193.93676	2667.97872	2154.66966	0.0	4.16667	14.41966	2134.93417	180.53907	99.46232
00348	c	2653.61...	2566.57177	3761.87916	74.26534	684.20411	3.5	5.91992	2159.50894	172.90727	135.0
00348	f	3199.72...	2701.86758	3660.69526	24.82402	762.2173	3.0	4.31262	2089.05483	177.57903	135.0
00151	b	1865.91...	189.93616	3638.74897	164.9362	82.85305	4.0	1.95537	2065.00351	182.0	225.0
00151	c	15169.3...	195.14688	3639.38152	170.14692	92.30804	4.0	3.19628	2063.53467	182.0001	270.0
00156	c	1915.42...	71.11869	3845.38819	46.1188	0.0	3.0	2.86144	2062.39102	182.06082	180.0
00027	p	35862.7...	1652.20783	7139.02729	24.2539	0.0	1.5	3.07817	2014.17039	173.0	135.0
00041	p	1818.44...	2792.86352	1109.54663	2067.13113	87.00308	5.5	3.808	2055.08939	184.0	341.56506
00087	d	6720.43...	25.00325	1673.63295	25.00325	0.0	2.5	1.49425	2057.51868	185.20225	270.0
00087	h	16221.6...	24.99625	1672.23042	24.99625	0.0	2.4	1.98186	2056.84557	185.557	153.43495
00088	b	20490.7...	79.99813	1752.11689	79.99813	75.12244	2.85714	1.63415	2058.82165	185.78084	180.0
00088	c	5910.90...	25.00005	1654.00035	25.00005	0.0	2.72727	1.01805	2058.75605	185.45433	360.0
00088	g	2943.19...	57.86794	1847.42095	57.86794	704.04613	2.4	2.29061	2062.31341	185.99998	180.0
00088	h	5170.36...	88.13881	1857.38143	88.13881	737.86641	2.4	0.76354	2062.55313	185.99903	180.0
00088	k	1470.65...	254.22155	2012.26736	1480.03763	883.95464	3.0	1.84277	2061.35251	185.91124	153.43495
00088	r	3987.70...	1209.53478	2284.57883	1178.99795	1227.68832	2.5	0.27002	2062.61132	185.01005	-99999.0
00173	g	1107.11...	49.37222	3620.43452	24.37209	413.71768	3.0	2.29061	2063.10476	182.99402	180.0

Fig. 7.16.- Captura gvSIG de parte de tabla de atributos en localización de instalaciones solares fotovoltaicas

Dado que el número de alternativas para cada tecnología renovable es del orden de 10^4 , se representará de manera resumida (tablas 7.1 y 7.2) la forma que tendrá cada una de las tablas de atributos que posteriormente se evaluarán mediante sistemas de ayuda a la decisión.



<i>Localización de instalaciones solares</i>		
<i>Atributos (criterios)</i>	<i>Fotovoltaicas</i>	<i>Termoeléctricas</i>
	<i>Nº Alternativas</i>	<i>Nº Alternativas</i>
Área		
Distancia a núcleos de población		
Distancia a subestaciones transformadoras		
Distancia a principales carreteras		
Distancia a redes eléctricas		
Capacidad agrológica	66.845	32.906
Pendiente		
Potencial de Radiación Solar		
Temperatura		
Orientación		

Tabla 7.1.- Esquema de tabla de atributos en plantas solares

<i>Localización de parques eólicos</i>	
<i>Atributos (criterios)</i>	<i>Nº Alternativas</i>
Área	
Distancia a núcleos de población	
Distancia a subestaciones transformadoras	
Distancia a principales carreteras	
Distancia a redes eléctricas	
Distancia a principales aeropuertos	33.290
Distancia a antenas	
Capacidad agrológica	
Velocidad del viento	
Pendiente	

Tabla 7.2.- Esquema de tabla de atributos en parques eólicos



7.3. Ejecución de la regla de decisión

7.3.1. Obtención del peso de los criterios mediante la metodología AHP

Para resolver este problema de localización, es posible utilizar un método de decisión multicriterio MCDM (Chen y Hwang 1992, Hwang y Yoon 1981, Keeney y Raiffa 1976, Luce y Raiffa 1957), donde para elegir la mejor alternativa A_i , $i=1,2,\dots,n$ con $n \geq 2$ se consideran una serie de criterios C_j , $j=1,2,\dots,m$ con $m \geq 2$ y expertos E_k , $k=1,2,\dots,r$ con $r \geq 2$; teniendo en cuenta que tanto n como r son finitos.

Concretamente, para la determinación del peso de los criterios se aplicará el MCDM desarrollado por Saaty (1980) denominado Proceso Analítico Jerárquico (AHP), el cual ha sido descrito en el Capítulo V de la presente Tesis Doctoral.

7.3.1.1. Encuesta a expertos para la obtención del peso de los criterios

Para llevar a cabo la extracción del conocimiento de los expertos se utilizará una técnica pseudo-Delphi en la que los miembros que intervienen en la decisión son independientes entre sí, es decir, no interactúan entre sí en el momento de la extracción del conocimiento. Con esa finalidad se elaboró un cuestionario similar al realizado por García-Cascales et al (2011) el cual, fue entregado a expertos con el objetivo de reducir la incertidumbre y la imprecisión del problema planteado.

El grupo de expertos que participaron en el proceso de decisión de instalaciones solares fotovoltaicas, estaba compuesto por un doctor ingeniero (experto E_1) especializado en tecnología solar fotovoltaica, un doctor físico (experto E_2) con más de 10 años de experiencia en energía solar fotovoltaica y un promotor de instalaciones de EERR (Experto E_3) con más de 5 años de experiencia en el sector.

El grupo de expertos que participaron en el proceso de decisión de instalaciones solares termoeléctricas estaba compuesto por tres doctores ingenieros (expertos E_1 , E_2 y E_3) y un doctor físico (experto E_4) con más de 10 años de experiencia en el sector de las EERR, todos ellos especializados en tecnologías solar fotovoltaica y termoeléctrica.



En el caso de localización de parques eólicos, el grupo de expertos que participaron en el proceso de decisión estaba compuesto por un doctor ingeniero (experto E_1) especializado en energía renovables, un doctor ingeniero (experto E_2) con más de 10 años de experiencia en energía eólica y un promotor de instalaciones de EERR (Experto E_3) con más de 5 años de experiencia en el sector.

Aunque los expertos que intervienen en la obtención del peso de los criterios proceden de diferentes ámbitos (profesional, académico e investigador), en los tres casos a analizar (energía solar fotovoltaica, termoeléctrica y eólica), cada uno de los expertos tendrá la misma importancia.

El cuestionario se divide en dos partes claramente diferenciadas:

1. Se expone el problema de decisión indicando cuál es el objetivo a alcanzar (localización óptima de emplazamientos de instalaciones solares fotovoltaicas, termoeléctricas y parques eólicos), la metodología que se utilizará y los criterios que influirán en el proceso de toma de decisiones. De esta forma se describen los elementos fundamentales del problema de decisión a través de una estructura jerárquica como la representada en las figuras 7.2 y 7.3.
2. Está basada en las estructuras jerárquicas descritas y su finalidad es la recogida de datos para obtener el peso o coeficiente de importancia de los criterios. La encuesta está compuesta por un bloque de 3 preguntas:

- P1: ¿cree que los diez criterios considerados presentan el mismo peso?

Si la respuesta es afirmativa, $w_i = w_j = 1/n \quad \forall i, j$ no será necesario aplicar ninguna MCDM para obtener los pesos de los criterios dado que estos tendrán el mismo valor. En caso contrario, es decir, si los expertos consideran que no todos los criterios tienen igual importancia, se formulará la segunda pregunta del cuestionario:

- P2: Escriba los criterios de mayor a menor importancia



Según los expertos, el orden de importancia de los criterios para los tres tipos de instalaciones de EERR objeto de análisis, será el mostrado en la tabla 7.3.

<i>Energía solar fotovoltaica</i>	
E ₁	$C_8 > C_6 > C_4 > C_{10} > C_2 > C_3 > C_9 > C_5 > C_7 > C_1$
E ₂	$C_7 > C_2 = C_3 > C_5 = C_{10} > C_6 = C_8 > C_1 = C_4 > C_9$
E ₃	$C_9 > C_6 > C_4 > C_2 > C_8 > C_5 > C_{10} > C_3 > C_7 > C_1$
<i>Energía solar termoeléctrica</i>	
E ₁	$C_9 > C_3 > C_2 > C_{10} > C_4 > C_6 > C_8 > C_7 > C_5 > C_1$
E ₂	$C_8 > C_6 > C_2 > C_4 > C_3 > C_9 > C_{10} > C_5 > C_7 > C_1$
E ₃	$C_4 > C_1 > C_6 > C_8 > C_5 > C_9 > C_2 > C_3 > C_7 > C_{10}$
E ₄	$C_5 = C_7 = C_{10} > C_1 = C_2 > C_4 = C_6 = C_8 > C_3 = C_9$
<i>Energía eólica</i>	
E ₁	$C_{10} > C_4 = C_6 = C_7 = C_8 > C_2 = C_9 > C_5 > C_1 = C_3$
E ₂	$C_{10} > C_2 = C_5 = C_6 = C_7 = C_8 > C_1 = C_3 = C_4 = C_9$
E ₃	$C_{10} > C_7 > C_2 = C_5 = C_8 > C_4 = C_6 > C_1 = C_3 = C_9$

Tabla 7.3.- Orden de importancia de los criterios para cada uno de los expertos

Una vez obtenidos los órdenes de importancia que aporta cada uno de los expertos, se procederá a formular la tercera pregunta:

- P3: Compare el criterio que ha considerado en primer lugar con respecto al que ha considerado en segundo lugar y sucesivos, utilizando las siguientes etiquetas, (II), (M+), (+I), (Mu+I), (Ex+I) según el significado de la tabla 7.4.

El cuestionario indicado se ha llevado a cabo de la forma descrita, por un lado para facilitar la contestación de los expertos que intervienen en la obtención del peso de los criterios y por otro para conseguir una mayor consistencia en la decisión.

7.3.1.2. Configuración de datos

La información proporcionada por los expertos presenta un carácter cualitativo más o menos impreciso por el hecho de haber sido obtenida a través de términos lingüísticos, por ello los datos obtenidos se deberán configurar y modelar de forma que resulte factible y sencilla su posterior manipulación.



Entre las diversas opciones para representar la información, y debido a que por un lado los datos se agrupan perfectamente y, por otro su manejo es sencillo y eficaz, se optará por representar la información mediante números difusos (Delgado et al 1992, Herrera et al 2009). En el caso particular a estudio, los datos proporcionados se representarán mediante números difusos triangulares (Zadeh 1965, Klir y Yuan 1995, Dubois 1980) tanto para el cálculo del peso de los criterios como para la posterior evaluación de las alternativas ya que, la información que se dispone en algunos de los criterios considerados es de naturaleza cualitativa y no cuantitativa.

7.3.1.3. Cálculo del peso de los criterios

El peso de los criterios se determinará mediante comparación por pares entre criterios. A consecuencia del proceso de recogida de datos utilizado, se requerirán un total de $(n-1)$ comparaciones en lugar de las $n \cdot (n-1)/2$ comparaciones que hubieran sido necesarias al tratarse de una matriz de orden 10×10 . Las etiquetas que se han usado y su significado se muestran en la tabla 7.4.

<i>Escala lingüística</i>	<i>Etiquetas</i>	<i>Escala Difusa Triangular</i>	<i>Escala recíproca difusa triangular</i>
Igualmente importante	II	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
Moderadamente más importante	M+I	(2, 3, 4)	(1/4, 1/3, 1/2)
Más importante	+I	(4, 5, 6)	(1/6, 1/5, 1/4)
Mucho más importante	Mu+I	(6, 7, 8)	(1/8, 1/7, 1/6)
Extremadamente más importante	Ex+I	(8, 9, 9)	(1/9, 1/9, 1/8)

Tabla 7.4.- Escala de valoración en el proceso de comparación por pares (Saaty, 1980)

A modo de ejemplo, se desarrollará el proceso de comparación por pares entre criterios para el caso de emplazamientos óptimos de instalaciones solares fotovoltaicas y el experto 1, la valoración por pares serán los siguientes:

$$C_8 \begin{bmatrix} C_8 & C_6 & C_4 & C_{10} & C_2 & C_3 & C_9 & C_5 & C_7 & C_1 \\ (II) & (M+I) & (+I) & (+I) & (Mu+I) & (Mu+I) & (Mu+I) & (Ex+I) & (Ex+I) & (Ex+I) \end{bmatrix}$$



Expresados en números difusos triangulares según la tabla 7.4. resultan ser de la siguiente forma:

$$C_8 \begin{matrix} C_8 & C_6 & C_4 & C_{10} & C_2 & C_3 & C_9 & C_5 & C_7 & C_1 \\ \left[(1,1,1) & (2,3,4) & (4,5,6) & (4,5,6) & (6,7,8) & (6,7,8) & (6,7,8) & (8,9,9) & (8,9,9) & (8,9,9) \right] \end{matrix}$$

Según Garcia-Cascales y Lamata (2011) y, mediante la expresión (7.1) se obtendrán los pesos para el ejemplo indicado (figura 7.17.).

$$\begin{matrix} C_8 \\ C_6 \\ C_4 \\ C_{10} \\ C_2 \\ C_3 \\ C_9 \\ C_5 \\ C_7 \\ C_1 \\ (2.292, 2.495, 2.875) \end{matrix} \begin{matrix} C_8 \\ \left(1,1,1 \right) \\ \left(1/4, 1/3, 1/2 \right) \\ \left(1/6, 1/5, 1/4 \right) \\ \left(1/6, 1/5, 1/4 \right) \\ \left(1/8, 1/7, 1/6 \right) \\ \left(1/8, 1/7, 1/6 \right) \\ \left(1/8, 1/7, 1/6 \right) \\ \left(1/9, 1/9, 1/8 \right) \\ \left(1/9, 1/9, 1/8 \right) \\ \left(1/9, 1/9, 1/8 \right) \end{matrix} = \begin{matrix} \left(0.348, 0.401, 0.436 \right) \\ \left(0.087, 0.134, 0.218 \right) \\ \left(0.058, 0.080, 0.109 \right) \\ \left(0.058, 0.080, 0.109 \right) \\ \left(0.043, 0.057, 0.073 \right) \\ \left(0.043, 0.057, 0.073 \right) \\ \left(0.043, 0.057, 0.073 \right) \\ \left(0.039, 0.045, 0.055 \right) \\ \left(0.039, 0.045, 0.055 \right) \\ \left(0.039, 0.045, 0.055 \right) \end{matrix}$$

Fig. 7.17.- Peso de los criterios de E_1 para localización de instalaciones solares fotovoltaicas

La matriz anterior se ha obtenido realizando una operación de normalización mediante la siguiente expresión:

$$\left(w_{c_{ia}}, w_{c_{ib}}, w_{c_{ic}} \right) = \left[\frac{c_{ia}}{\sum_{i=1}^n c_{ic}}, \frac{c_{ib}}{\sum_{i=1}^n c_{ib}}, \frac{c_{ic}}{\sum_{i=1}^n c_{ia}} \right] \tag{7.1}$$

7.3.1.4. Resultado del peso de los criterios por experto

De manera análoga al procedimiento desarrollado para obtener los pesos de los criterios para el experto E_1 en el problema de localización de instalaciones solares fotovoltaicas, se procederá para el resto de expertos en este mismo problema de decisión (tabla 7.5.) y para los problemas de localización de instalaciones solares termoeléctricas (tabla 7.6.) y parques eólicos (tabla 7.7.)



	<i>Experto 1</i>	<i>Experto 2</i>	<i>Experto 3</i>
C ₁	[0.039, 0.045, 0.055]	[0.050, 0.054, 0.062]	[0.026, 0.027, 0.032]
C ₂	[0.043, 0.057, 0.073]	[0.057, 0.069, 0.082]	[0.039, 0.049, 0.063]
C ₃	[0.043, 0.057, 0.073]	[0.057, 0.069, 0.082]	[0.026, 0.027, 0.032]
C ₄	[0.058, 0.080, 0.109]	[0.050, 0.054, 0.062]	[0.235, 0.247, 0.254]
C ₅	[0.039, 0.045, 0.055]	[0.050, 0.054, 0.062]	[0.039, 0.049, 0.063]
C ₆	[0.087, 0.134, 0.218]	[0.050, 0.054, 0.062]	[0.235, 0.247, 0.254]
C ₇	[0.039, 0.045, 0.055]	[0.453, 0.485, 0.493]	[0.026, 0.027, 0.032]
C ₈	[0.348, 0.401, 0.436]	[0.050, 0.054, 0.062]	[0.039, 0.049, 0.063]
C ₉	[0.043, 0.057, 0.073]	[0.050, 0.054, 0.062]	[0.235, 0.247, 0.254]
C ₁₀	[0.058, 0.080, 0.109]	[0.050, 0.054, 0.062]	[0.026, 0.027, 0.032]

Tabla 7.5.-Pesos de los criterios en localización de instalaciones solares fotovoltaicas

	<i>Experto 1</i>	<i>Experto 2</i>	<i>Experto 3</i>	<i>Experto 4</i>
C ₁	[0.029, 0.036, 0.047]	[0.036, 0.042, 0.053]	[0.233, 0.272, 0.298]	[0.056, 0.068, 0.082]
C ₂	[0.066, 0.109, 0.188]	[0.080, 0.127, 0.211]	[0.029, 0.039, 0.050]	[0.049, 0.053, 0.061]
C ₃	[0.066, 0.109, 0.188]	[0.040, 0.054, 0.070]	[0.029, 0.039, 0.050]	[0.049, 0.053, 0.061]
C ₄	[0.044, 0.065, 0.094]	[0.053, 0.076, 0.105]	[0.233, 0.272, 0.298]	[0.049, 0.053, 0.061]
C ₅	[0.033, 0.047, 0.063]	[0.036, 0.042, 0.053]	[0.058, 0.091, 0.149]	[0.444, 0.477, 0.490]
C ₆	[0.044, 0.065, 0.094]	[0.080, 0.127, 0.211]	[0.058, 0.091, 0.149]	[0.049, 0.053, 0.061]
C ₇	[0.044, 0.065, 0.094]	[0.036, 0.042, 0.053]	[0.029, 0.039, 0.050]	[0.056, 0.068, 0.082]
C ₈	[0.044, 0.065, 0.094]	[0.320, 0.380, 0.421]	[0.058, 0.091, 0.149]	[0.049, 0.053, 0.061]
C ₉	[0.264, 0.327, 0.377]	[0.040, 0.054, 0.070]	[0.029, 0.039, 0.050]	[0.049, 0.053, 0.061]
C ₁₀	[0.066, 0.109, 0.188]	[0.040, 0.054, 0.070]	[0.026, 0.030, 0.037]	[0.056, 0.068, 0.082]

Tabla 7.6.- Pesos de los criterios en localización de instalaciones solares termoeléctricas

	<i>Experto 1</i>	<i>Experto 2</i>	<i>Experto 3</i>
C ₁	[0.028, 0.036, 0.047]	[0.048, 0.051, 0.060]	[0.038, 0.044, 0.054]
C ₂	[0.043, 0.065, 0.093]	[0.054, 0.066, 0.081]	[0.056, 0.078, 0.107]
C ₃	[0.028, 0.036, 0.047]	[0.048, 0.051, 0.060]	[0.038, 0.044, 0.054]
C ₄	[0.064, 0.108, 0.187]	[0.048, 0.051, 0.060]	[0.042, 0.056, 0.071]
C ₅	[0.032, 0.046, 0.062]	[0.054, 0.066, 0.081]	[0.056, 0.078, 0.107]
C ₆	[0.064, 0.108, 0.187]	[0.054, 0.066, 0.081]	[0.042, 0.056, 0.071]
C ₇	[0.064, 0.108, 0.187]	[0.054, 0.066, 0.081]	[0.085, 0.131, 0.214]
C ₈	[0.064, 0.108, 0.187]	[0.054, 0.066, 0.081]	[0.056, 0.078, 0.107]
C ₉	[0.043, 0.065, 0.093]	[0.048, 0.051, 0.060]	[0.038, 0.044, 0.054]
C ₁₀	[0.255, 0.323, 0.373]	[0.429, 0.463, 0.483]	[0.338, 0.392, 0.429]

Tabla 7.7.- Pesos de los criterios en localización de parques eólicos



7.3.1.5. Resultado del peso de los criterios por grupo de decisión (agregaciones homogéneas)

Con el objetivo de unificar los pesos de los criterios obtenidos se procederá a realizar una agregación de forma homogénea (es decir, todos los expertos tienen la misma importancia en la decisión), como medida de agregación se recurrirá a la media aritmética (expresión 7.2).

$$(\bar{X}_{ia}, \bar{X}_{ib}, \bar{X}_{ic}) = \left[\frac{\sum_{i=1}^n X_{ia}}{n}, \frac{\sum_{i=1}^n X_{ib}}{n}, \frac{\sum_{i=1}^n X_{ic}}{n} \right] \quad (7.2)$$

Mediante las agregaciones homogéneas indicadas, se obtendrán los pesos de los criterios teniendo en cuenta a la totalidad de los miembros de cada grupo de decisión.

Instalaciones solares fotovoltaicas

Los valores obtenidos realizando las agregaciones homogéneas mencionadas para el problema de localización de instalaciones solares fotovoltaicas serán los indicados en la tabla 7.8.

<i>Criterios</i>	<i>Vector de pesos</i>		
C ₁	0.0384	0.0419	0.0493
C ₂	0.0464	0.0586	0.0728
C ₃	0.0421	0.0513	0.0622
C ₄	0.1145	0.1271	0.1414
C ₅	0.0427	0.0493	0.0599
C ₆	0.1242	0.1449	0.1778
C ₇	0.1725	0.1855	0.1931
C ₈	0.1458	0.1680	0.1871
C ₉	0.1097	0.1195	0.1293
C ₁₀	0.0448	0.0538	0.0675

Tabla 7.8.- Vector de pesos mediante agregación homogénea y media aritmética para el problema de localización de instalaciones solares fotovoltaicas



Los resultados mostrados en la tabla 7.8. se representan gráficamente de la forma indicada en la fig. 7.18.

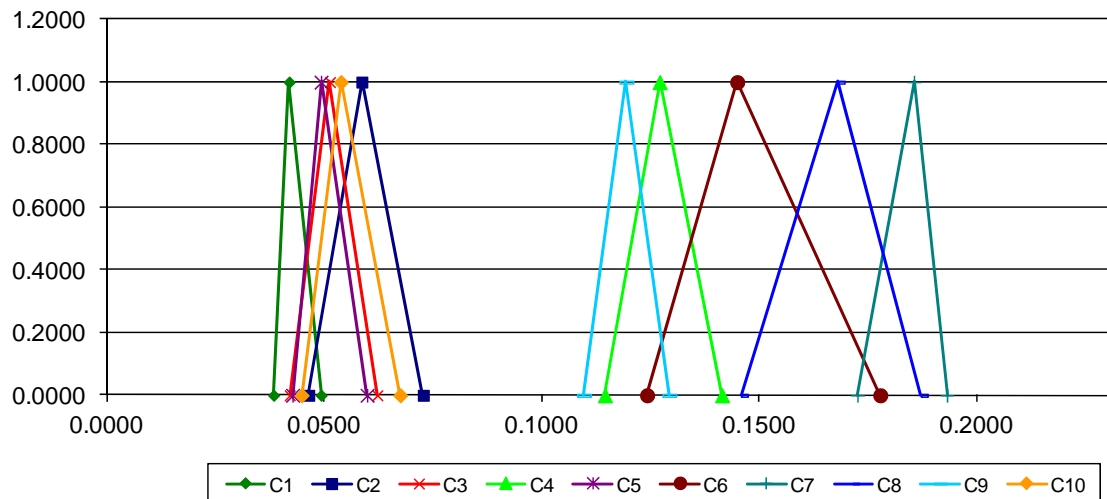


Fig. 7.18.- Valores de criterios para localización de instalaciones solares fotovoltaicas (agregación homogénea)

Analizando tanto la tabla 7.8. como la figura 7.18. se observa que los tres criterios mejor valorados para el problema de localización de instalaciones solares fotovoltaicas son la distancia a redes de distribución (C_6), distancia a subestaciones transformadoras (C_8) y distancia a núcleos de población (C_7), resultando este último el mejor valorado.

Por el contrario los criterios que menos influyen en la decisión es decir, aquellos que presentan los valores más bajos, corresponden al criterio de capacidad agrológica (C_1) y al criterio de distancia a carreteras (C_5)

Instalaciones solares termoeléctricas

Procedimiento de forma análoga para el problema de decisión de instalaciones solares termoeléctricas, se obtendrán los valores de los pesos de los criterios (tabla 7.9.)



<i>Criterios</i>	<i>Vector de pesos</i>		
C ₁	0.0884	0.1046	0.1197
C ₂	0.0561	0.0819	0.1275
C ₃	0.0461	0.0638	0.0924
C ₄	0.0949	0.1165	0.1396
C ₅	0.1428	0.1642	0.1885
C ₆	0.0579	0.0840	0.1287
C ₇	0.0410	0.0537	0.0695
C ₈	0.1179	0.1474	0.1813
C ₉	0.0956	0.1184	0.1395
C ₁₀	0.0468	0.0655	0.0944

Tabla 7.9.- Vector de pesos mediante agregación homogénea y media aritmética para el problema de localización de instalaciones solares termoeléctricas

Los resultados mostrados en la tabla 7.9. se representan gráficamente de la forma indicada en la fig. 7.19.

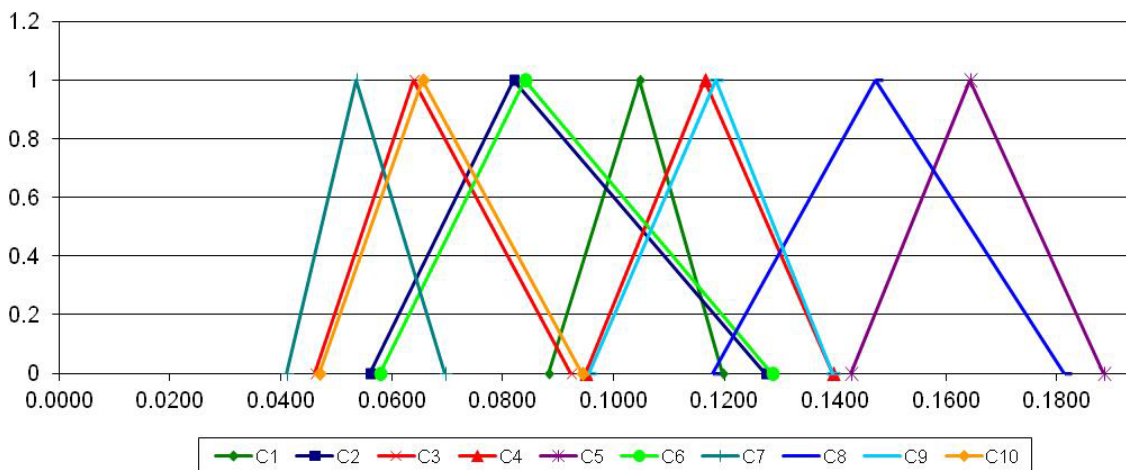


Fig. 7.19.- Valores de criterios para localización de instalaciones solares termoeléctricas (agregación homogénea)

Analizando en este caso la tabla 7.9. y la figura 7.19 se observa que los tres criterios mejor valorados para el problema de localización de instalaciones solares termoeléctricas son el potencial de radiación solar (C₉), distancia a subestaciones transformadoras (C₈) y distancia a principales carreteras (C₅), resultando este último el mejor valorado. Por el contrario los criterios que menos influyen en la decisión en este caso son la distancia a núcleos de población (C₇) y la orientación del terreno (C₃).



Parques eólicos

De igual modo, realizando la media aritmética de los pesos o coeficientes de importancia extraídos de los expertos en instalaciones de energía eólica, se obtendrán los valores de los pesos mostrados en la tabla 7.10.

<i>Críterios</i>	<i>Vector de pesos</i>		
C ₁	0.0378	0.0436	0.0535
C ₂	0.0508	0.0697	0.0936
C ₃	0.0378	0.0436	0.0535
C ₄	0.0512	0.0717	0.1061
C ₅	0.0473	0.0635	0.0833
C ₆	0.0532	0.0766	0.1128
C ₇	0.0673	0.1015	0.1605
C ₈	0.0579	0.0840	0.1247
C ₉	0.0426	0.0532	0.0691
C ₁₀	0.3406	0.3926	0.4283

Tabla 7.10.- Vector de pesos mediante agregación homogénea y media aritmética para el problema de localización de parques eólicos

La forma gráfica de los resultados mostrados en la tabla 7.10. se observan en la fig.7.20.

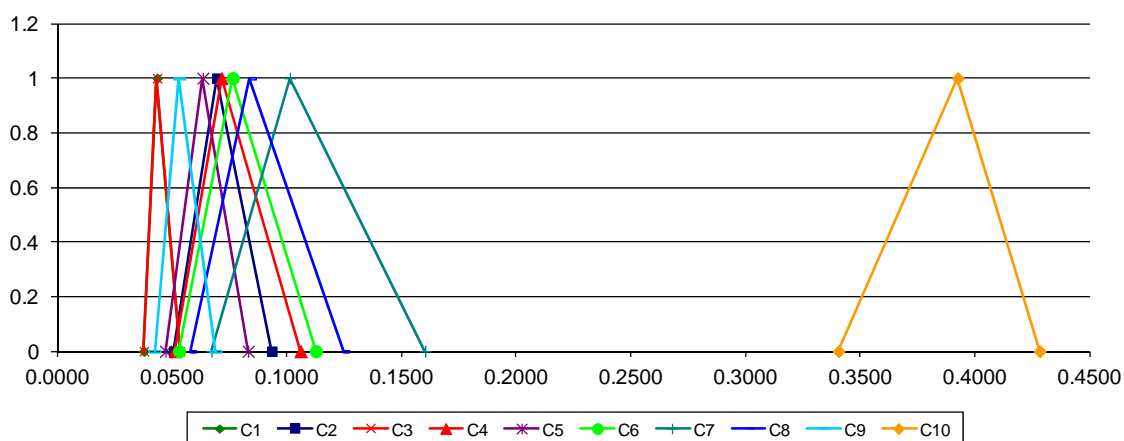


Fig. 7.20.- Valores de criterios para localización de parques eólicos (agregación homogénea)

En la figura 7.20. se observa que hay un criterio que influye mucho más que el resto en la localización de parques eólicos, éste es la velocidad del viento (C₁₀). Alejados a una distancia bastante considerable se sitúan el segundo y tercer criterio en importancia:



distancia a núcleos de población (C_7) y distancia a subestaciones transformadoras (C_8). El resto de criterios presentan valores próximos entre sí, resultando los criterios menos valorados la distancia a principales aeropuertos (C_3) y distancia a antenas o infraestructuras de telecomunicaciones (C_9)

7.3.1.6. Conclusiones de las valoraciones de criterios obtenidas

Comparando los resultados obtenidos para las tecnologías de energía solar (fotovoltaica y termoeléctrica), es de destacar que aunque, según los expertos, los criterios de decisión que influyen en la localización de este tipo de instalaciones son idénticos, éstos no influyen de igual manera.

El criterio mejor valorado para el caso de instalaciones solares fotovoltaicas corresponde a la distancia de núcleos de población (C_7) mientras que este criterio para el caso de instalaciones solares termoeléctricas es el que presenta la peor valoración.

Para el caso de instalaciones solares termoeléctricas el criterio mejor valorado corresponde a la distancia a principales carreteras (C_5) mientras que este mismo criterio para el caso de instalaciones solares fotovoltaicas es uno de los peores valorados. Entre las diversas razones que argumentan esta notable diferencia, destaca las características físicas de este tipo de instalaciones por ejemplo; los equipos, sistemas y componentes que se requieren para implantar una instalación solar termoeléctrica son de tal envergadura que se necesita disponer de redes de infraestructuras como carreteras lo suficientemente próximas al lugar de implantación. En el caso de instalaciones fotovoltaicas este criterio no constituye una gran ventaja puesto que sus equipos son de menores tamaños y más manejables sin necesidad de requerir de infraestructuras de comunicaciones próximas.

También es interesante destacar en el caso de las instalaciones solares que hay una serie de criterios cuya importancia es similar, éstos son el potencial de radiación solar (C_9), la distancia a subestaciones transformadoras (C_8) y el área de la parcela (C_4).



En el caso de localización de parques eólicos, hay un criterio que destaca muy por encima del resto, éste es la velocidad del viento (C_{10}), el hecho de que este criterio está tan valorado puede deberse a que es un parámetro que permite directamente descartar emplazamientos ya que, si en una zona la velocidad del viento es prácticamente nula, dicha zona habría que descartarla puesto que rara vez se pondrían en funcionamiento los aerogeneradores del parque. Es interesante constatar que los siguientes criterios en importancia son la distancia a núcleos de población (C_7) y distancia a subestaciones transformadoras (C_8), las causas de tales valores podrían ser por un lado el impacto que genera en la población el hecho de tener un parque eólico cercano (aunque cumpla con la totalidad de restricciones existentes) y, por otro lado la potencia generada por este tipo de instalaciones implica que la conexión con las redes existentes se produzca normalmente en las propias subestaciones transformadoras.

Con el análisis de valoración de criterios realizado se ha demostrado que hay que tener en cuenta una serie de criterios para seleccionar cuál es el mejor emplazamiento de una instalación de EERR. Además, en el caso de que los criterios sean coincidentes (instalaciones solares), éstos no influyen de igual manera en la decisión por lo que es de gran importancia conocer previamente su peso para cada tecnología a la hora de implantar instalaciones de esta índole.

7.3.2. Evaluación de las alternativas aplicando la metodología TOPSIS

Una vez obtenidos los pesos de los criterios que influyen en la localización de instalaciones solares fotovoltaicas, termoeléctricas y eólicas, se procederá a evaluar las alternativas obtenidas con el software gvSIG para cada tecnología, tales alternativas corresponden con las parcelas y subparcelas catastrales aptas para implantar instalaciones de EERR definidas en el capítulo anterior.

Antes de proceder a la evaluación de las alternativas a través de la metodología TOPSIS, es necesario hacer constatar lo siguiente: entre los criterios que influyen en el problema de decisión y cuyos valores ha proporcionado gvSIG existe una serie de criterios de naturaleza cualitativa definidos mediante etiquetas lingüísticas a modelar

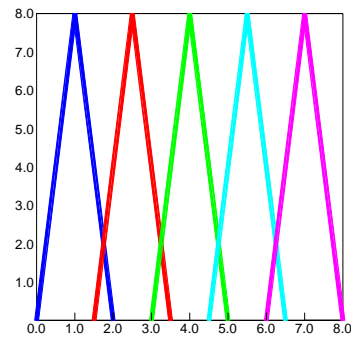


mediante números difusos así que, la toma de decisión multicriterio se realizará incluyendo tanto valores numéricos como etiquetas lingüísticas. Por ello, en la presente Tesis se utilizará el método TOPSIS difuso para seleccionar el orden de preferencias de las alternativas.

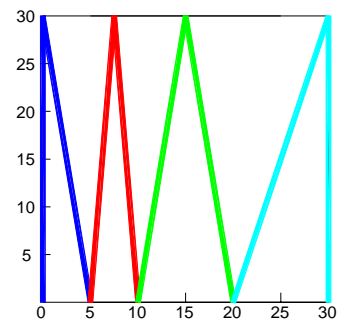
7.3.2.1. Definición de criterios para aplicar TOPSIS difuso

Entre los criterios que influyen en la búsqueda y evaluación de emplazamientos para albergar instalaciones solares, habrá una serie de criterios que serán definidos mediante etiquetas lingüísticas (figura 7.21).

<i>Localización instalaciones solares y eólicas</i>	
<i>Capacidad Agrológica (C_1)</i>	
<i>Etiquetas Lingüísticas</i>	<i>Números difusos triangulares</i>
Muy baja	(0, 1, 2)
Baja	(1.5, 2.5, 3.5)
Media	(3, 4, 5)
Alta	(4.5, 5.5, 6.5)
Muy Alta	(6, 7, 8)



<i>Localización instalaciones solares y eólicas</i>	
<i>Pendiente (C_2)</i>	
<i>Etiquetas Lingüísticas</i>	<i>Números difusos triangulares</i>
Muy buena	(0, 0, 5)
Buena	(5, 7.5, 10)
Regular	(10, 15, 20)
Mala	(20, 30, 30)



<i>Localización instalaciones solares</i>	
<i>Orientación (C_3)</i>	
<i>Etiquetas Lingüísticas</i>	<i>Números difusos triangulares</i>
Mala	(0, 0.10, 0.20)
Regular	(0.20, 0.35, 0.50)
Buena	(0.5, 0.65, 0.80)
Muy buena	(0.80, 0.90, 1.0)

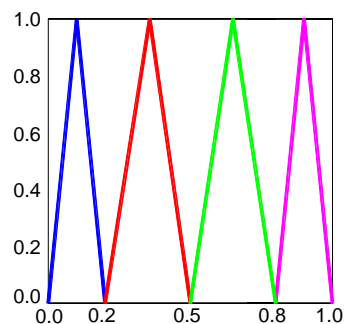


Fig. 7.21.- Etiquetas lingüísticas de los criterios C_1 , C_2 y C_3 según tecnología renovable



También habrá otros criterios que por sus características se definirán mediante números difusos triangulares en lugar de etiquetas lingüísticas, éstos serán el potencial de radiación solar (C_9), la temperatura media (C_{10}) en instalaciones solares y la velocidad del viento (C_{10}) para implantación de parques eólicos. Los valores de tales criterios se definirán mediante la expresión (7.3)

$$(X_i - \sigma, X_i, X_i + \sigma) \quad \text{Siendo} \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{N}} \quad (7.3)$$

El resto de criterios se definirán mediante la lógica tradicional, es decir, con los propios valores numéricos (crisp) que ha proporcionado el software gvSIG pero a efectos de computar se pondrán por ejemplo de la siguiente forma: (10, 10, 10).

7.3.2.2. Aplicación del método TOPSIS difuso

Con gvSIG se obtendrán tres tablas (una por cada tecnología renovable) denominadas tablas de atributos que constituirán el punto de partida para aplicar el método TOPSIS, se extraerán del software y se guardarán en formato Excel con la finalidad de desarrollar la totalidad del método TOPSIS a través del software Microsoft Excel. Las etapas o pasos a seguir son los habituales en la metodología TOPSIS difusa:

Etapa 1.- Construcción de la matriz de decisión

Se crearán tres matrices de decisión (una por cada tecnología renovable), éstas estarán compuestas por una mezcla de valores numéricos tipo crisp, números difusos triangulares y etiquetas lingüísticas. Debido a que las matrices obtenidas con el software gvSIG únicamente reflejan valores numéricos tradicionales, en el software Microsoft Excel se sustituirán los valores crisp de los criterios citados en el apartado anterior por las etiquetas lingüísticas y números difusos triangulares indicadas.

Dado el tamaño de cada una de las matrices de decisión, no resulta posible mostrarla en su totalidad de forma clara y coherente, por ello se representará de manera esquemática la estructura de cada una de las matrices de decisión:



	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6	w_7	w_8	w_9	w_{10}
	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}
A_1	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}	x_{18}	x_{19}	x_{110}
	~	~	~							
A_2	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}	x_{25}	x_{26}	x_{27}	x_{28}	x_{29}	x_{210}
	~	~	~							
...
A_{66845}	$x_{66845\ 1}$	$x_{66845\ 2}$	$x_{66845\ 3}$	$x_{66845\ 4}$	$x_{66845\ 5}$	$x_{66845\ 6}$	$x_{66845\ 7}$	$x_{66845\ 8}$	$x_{66845\ 9}$	$x_{66845\ 10}$
	~	~	~							

Tabla 7.11.- Matriz de decisión difusa para localización de emplazamientos de instalaciones solares fotovoltaicas

	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6	w_7	w_8	w_9	w_{10}
	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}
A_1	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}	x_{18}	x_{19}	x_{110}
	~	~	~							
A_2	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}	x_{25}	x_{26}	x_{27}	x_{28}	x_{29}	x_{210}
	~	~	~							
...
A_{32906}	$x_{32906\ 1}$	$x_{32906\ 2}$	$x_{32906\ 3}$	$x_{32906\ 4}$	$x_{32906\ 5}$	$x_{32906\ 6}$	$x_{32906\ 7}$	$x_{32906\ 8}$	$x_{32906\ 9}$	$x_{32906\ 10}$
	~	~	~							

Tabla 7.12.- Matriz de decisión difusa para localización de emplazamientos de instalaciones solares termoeléctricas

	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6	w_7	w_8	w_9	w_{10}
	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}
A_1	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}	x_{18}	x_{19}	x_{110}
	~	~								
A_2	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}	x_{25}	x_{26}	x_{27}	x_{28}	x_{29}	x_{210}
	~	~								
...
A_{33290}	$x_{33290\ 1}$	$x_{33290\ 2}$	$x_{33290\ 3}$	$x_{33290\ 4}$	$x_{33290\ 5}$	$x_{33290\ 6}$	$x_{33290\ 7}$	$x_{33290\ 8}$	$x_{33290\ 9}$	$x_{33290\ 10}$
	~	~								

Tabla 7.13.- Matriz de decisión difusa para localización de emplazamientos de parques eólicos



Donde:

- $C_j, j=1, \dots, 10$, representan los atributos/criterios en función de los cuales se evalúan las alternativas.
- $A_i, i=1, \dots, 66845$ (fotovoltaica), $i=1, \dots, 32906$ (termoeléctrica), $i=1, \dots, 33290$ (eólica), denota las posibles alternativas
- $W = \left[w_1, w_2, \dots, w_{10} \right]$ es el vector de pesos asociado con C_j representados en las tablas 7.8, 7.9 y 7.10 del presente capítulo.
- $z_{ij} = \left\{ x_{ij}, x_{ij} \right\}$ representa las valoraciones de A_i con respecto a algún atributo/criterio; siendo $x_{ij} = \left[x_{ij}^a, x_{ij}^b, x_{ij}^c \right]$ la representación de un valor numérico difuso y $x_{ij} = \left[x_{ij}^a, x_{ij}^b, x_{ij}^c \right]$ la de una etiqueta lingüística.

Etapa 2.- Normalización de la matriz de decisión difusa

En el método TOPSIS difuso, $n_{ij}=(n_{ij}^a, n_{ij}^b, n_{ij}^c)$ es un número difuso y por tanto se requiere aplicar las operaciones definidas en el modelado lingüístico difuso.

Etapa 3.- Construcción de la matriz de decisión normalizada ponderada

De manera similar al TOPSIS clásico, se ponderará la matriz normalizada teniendo en cuenta las operaciones para números difusos.

Etapa 4.- Cálculo de las medidas de distancia

La distancia es el grado o cantidad de separación entre dos puntos, líneas, superficies u objetivos. En la versión difusa del método se realiza el cálculo de la distancia a la solución ideal positiva difusa *FPIS* y de la solución ideal negativa difusa *FNIS*



Etapa 5.- Cálculo de la proximidad relativa a la solución ideal

De igual manera que en el TOPSIS clásico, se procederá a calcular la proximidad relativa con la consideración de las operaciones correspondientes a la utilización de números difusos.

Etapa 6.- Ordenación de preferencias

Se ordenan las mejores alternativas de acuerdo con \bar{R}_i en orden descendente, teniendo en cuenta que los valores de \bar{R}_i serán números difusos por los que hay que establecer un procedimiento de defuzzificación García-Cascales y Lamata (2007).

Una vez finalizado el proceso se habrá obtenido una valoración de cada alternativa de forma que podrán clasificarse en cuatro grupos en función de la capacidad de acogida para albergar una instalación de EERR:

- Excelente capacidad
- Muy buena capacidad
- Buena capacidad
- Regular capacidad

Es interesante constatar que no se realizará ningún grupo que tenga mala capacidad de acogida, el motivo de ello es que en el capítulo anterior se habían eliminado aquellas alternativas que por cualquier restricción, impedían implantar cualquier instalación de EERR, por tanto en la evaluación realizada, no habrá ninguna alternativa que pueda denominarse con mala capacidad de acogida.

7.4. Selección de las mejores alternativas mediante gvSIG

Con la finalidad de seleccionar las mejores alternativas de forma diferente a la llevada a cabo a través de la metodología TOPSIS, se utilizará de nuevo el software gvSIG. El punto de partida será las tablas de atributos obtenidas con gvSIG (para cada tecnología



renovable), en las que se mostrará la información temática representada en filas y columnas de forma que, las filas (o registros) constituirán los objetos geográficos que en este caso serán las alternativas a evaluar (parcelas y subparcelas) y, las columnas (o campos) definirán los denominados atributos o variables temáticas (información catastral y criterios).

En cada una de las tablas se procederá a ejecutar sucesivos filtrados en función de los valores de cada uno de los criterios considerados, con el objetivo de eliminar aquellas alternativas que presenten, para alguno de dichos criterios, valores que las haga ser poco atractivas para implantar instalaciones de EERR.

De esta forma se reducirá considerablemente el número de alternativas iniciales y se obtendrá una nueva selección en las que, no habrá ningún valor (para cualquier criterio considerado) que provoque descartar alguna de las nuevas alternativas seleccionadas para albergar las instalaciones objeto de estudio.

7.5. Comparación de metodologías multicriterio mediante evaluación de las 20 mejores alternativas: TOPSIS vs ELECTRE-TRI

7.5.1. Selección de las 20 mejores alternativas

Partiendo de las alternativas evaluadas con la metodología TOPSIS, se escogerán las veinte mejor valoradas con el objetivo de realizar una nueva evaluación, en este caso dicha evaluación se realizará mediante el empleo de dos métodos de decisión multicriterio: El método TOPSIS clásico y el método ELECTRE-TRI (para aplicar éste último método se empleará el software IRIS). Esta nueva evaluación permitirá llevar a cabo una comparación entre dos metodologías de decisión multicriterio.

La comparación entre los métodos TOPSIS y ELECTRE-TRI se llevará a cabo únicamente mediante la evaluación de 20 alternativas (las mejor valoradas en la evaluación anterior) a consecuencia de las limitaciones que presenta el software utilizado para aplicar el método ELECTRE-TRI (software IRIS), además, dado que el objetivo que se pretende alcanzar con esta comparativa es analizar dos metodologías de



decisión multicriterio para un mismo problema de decisión, no resulta necesario evaluar la totalidad de las alternativas.

7.5.2. Clasificación de las mejores alternativas aplicando TOPSIS

La valoración de las 20 alternativas con mejor puntuación para cada caso de estudio (tecnología renovable) se llevará a cabo aplicando el método TOPSIS clásico. El punto de partida será tres matrices de decisión en la que se definen los valores de los criterios para cada una de las veinte alternativas. A modo de ejemplo en la tabla 7.14. se observa la matriz de decisión para el problema de localización de emplazamientos óptimos para albergar instalaciones de energía solar fotovoltaica.

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}
<i>Pesos</i>	0.042	0.059	0.051	0.127	0.049	0.145	0.186	0.168	0.119	0.054
A_1	5.11	18.36	360.00	1869381.18	25.00	1.00	0.00	22601.24	2119.61	14.15
A_2	5.00	8.39	360.00	1459838.72	1391.93	1.00	61.84	9657.79	2070.11	16.19
A_3	6.74	17.98	360.00	1449796.78	314.16	1.00	0.00	1522.72	2118.01	17.27
A_4	3.36	17.85	360.00	1437455.72	346.05	1.00	21.10	4575.45	1989.46	17.19
A_5	3.60	4.01	360.00	1342150.38	5261.26	1459.92	2747.76	22572.19	2023.37	14.75
A_6	6.00	16.24	360.00	1213962.32	25.00	1.00	120.06	1636.48	1936.77	17.41
A_7	4.55	5.52	360.00	1214563.22	25.00	1.00	225.61	11797.93	2054.53	17.46
A_8	3.00	5.99	360.00	1076798.93	5641.72	1366.64	4197.02	22951.44	1976.13	14.59
A_9	4.64	8.98	360.00	1029892.83	25.00	9768.12	1567.61	2977.26	2072.83	16.71
A_{10}	4.80	10.31	360.00	995818.81	25.00	1.00	42.50	18814.28	2158.23	15.04
A_{11}	5.38	2.19	360.00	983920.51	25.00	3274.24	562.87	23507.65	2033.34	14.70
A_{12}	3.40	5.18	360.00	958597.74	152.88	1.00	332.86	10878.60	2037.84	17.50
A_{13}	3.75	2.09	360.00	913552.98	25.00	40.64	2245.64	6331.07	2049.06	17.20
A_{14}	4.83	8.23	360.00	886366.28	943.82	1.00	956.15	10510.57	2071.82	16.20
A_{15}	3.85	3.18	360.00	862128.86	973.37	1.00	997.41	769.44	2059.35	18.90
A_{16}	4.12	14.05	360.00	863065.48	25.00	1.00	653.86	19882.67	2208.93	14.56
A_{17}	5.00	19.32	360.00	828404.89	959.21	93.94	2364.66	27859.92	2042.07	14.04
A_{18}	4.83	11.15	360.00	821109.41	1037.92	1.00	0.00	6645.13	1969.45	17.61
A_{19}	5.47	4.19	360.00	805302.46	25.00	1.00	1398.34	23962.96	2053.33	14.58
A_{20}	3.75	12.63	360.00	779994.00	25.00	1.00	170.18	3791.36	2034.12	18.08

Tabla 7.14.- Matriz de decisión (localización de emplazamientos de plantas fotovoltaicas)

El primer paso será normalizar los valores de los criterios asociados a las alternativas a evaluar, es decir los 20 emplazamientos (mejor valorados con TOPSIS difuso) para implantar instalaciones de energía renovable. Se convertirán los criterios dimensionales (distancias definidas en metros, pendiente en %, área en m^2 , etc.) en criterios adimensionales. Continuando con el ejemplo propuesto, la matriz normalizada para el problema de localización de emplazamientos para instalaciones fotovoltaicas será la mostrada en la tabla 7.15.



	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}
Pesos	0.042	0.059	0.051	0.127	0.049	0.145	0.186	0.168	0.119	0.054
A_1	0.2457	0.3623	0.2236	0.3711	0.0031	0.0001	0.0000	0.3264	0.2307	0.1945
A_2	0.2403	0.1655	0.2236	0.2898	0.1719	0.0001	0.0094	0.1395	0.2253	0.2225
A_3	0.3238	0.3549	0.2236	0.2878	0.0388	0.0001	0.0000	0.0220	0.2305	0.2373
A_4	0.1614	0.3522	0.2236	0.2854	0.0427	0.0001	0.0032	0.0661	0.2165	0.2363
A_5	0.1730	0.0791	0.2236	0.2665	0.6499	0.1391	0.4187	0.3260	0.2202	0.2026
A_6	0.2884	0.3205	0.2236	0.2410	0.0031	0.0001	0.0183	0.0236	0.2108	0.2392
A_7	0.2185	0.1088	0.2236	0.2411	0.0031	0.0001	0.0344	0.1704	0.2236	0.2399
A_8	0.1442	0.1182	0.2236	0.2138	0.6969	0.1302	0.6395	0.3315	0.2150	0.2005
A_9	0.2228	0.1771	0.2236	0.2045	0.0031	0.9307	0.2388	0.0430	0.2256	0.2297
A_{10}	0.2307	0.2034	0.2236	0.1977	0.0031	0.0001	0.0065	0.2717	0.2349	0.2067
A_{11}	0.2583	0.0433	0.2236	0.1953	0.0031	0.3120	0.0858	0.3395	0.2213	0.2020
A_{12}	0.1634	0.1022	0.2236	0.1903	0.0189	0.0001	0.0507	0.1571	0.2218	0.2405
A_{13}	0.1802	0.0412	0.2236	0.1814	0.0031	0.0039	0.3422	0.0914	0.2230	0.2363
A_{14}	0.2323	0.1623	0.2236	0.1760	0.1166	0.0001	0.1457	0.1518	0.2255	0.2226
A_{15}	0.1849	0.0628	0.2236	0.1712	0.1202	0.0001	0.1520	0.0111	0.2241	0.2597
A_{16}	0.1979	0.2772	0.2236	0.1714	0.0031	0.0001	0.0996	0.2871	0.2404	0.2001
A_{17}	0.2403	0.3812	0.2236	0.1645	0.1185	0.0090	0.3603	0.4023	0.2222	0.1929
A_{18}	0.2323	0.2201	0.2236	0.1630	0.1282	0.0001	0.0000	0.0960	0.2143	0.2419
A_{19}	0.2628	0.0827	0.2236	0.1599	0.0031	0.0001	0.2131	0.3461	0.2234	0.2003
A_{20}	0.1802	0.2493	0.2236	0.1549	0.0031	0.0001	0.0259	0.0548	0.2214	0.2484

Tabla 7.15.- Matriz normalizada (localización de emplazamientos de plantas fotovoltaicas)

El siguiente paso en la aplicación del método TOPSIS consistirá en ponderar los criterios ya normalizados. Para ello se le afectará al valor que toma cada criterio para cada alternativa por el peso correspondiente a dicho criterio. La matriz ponderada para huertos solares fotovoltaicos es de la forma siguiente (tabla 7.16.):

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}
Pesos	0.042	0.059	0.051	0.127	0.049	0.145	0.186	0.168	0.119	0.054
A_1	0.0103	0.0212	0.0115	0.0472	0.0002	0.0000	0.0000	0.0548	0.0276	0.0105
A_2	0.0101	0.0097	0.0115	0.0368	0.0085	0.0000	0.0017	0.0234	0.0269	0.0120
A_3	0.0136	0.0208	0.0115	0.0366	0.0019	0.0000	0.0000	0.0037	0.0275	0.0128
A_4	0.0068	0.0207	0.0115	0.0363	0.0021	0.0000	0.0006	0.0111	0.0259	0.0127
A_5	0.0073	0.0046	0.0115	0.0339	0.0320	0.0202	0.0777	0.0548	0.0263	0.0109
A_6	0.0121	0.0188	0.0115	0.0306	0.0002	0.0000	0.0034	0.0040	0.0252	0.0129
A_7	0.0092	0.0064	0.0115	0.0306	0.0002	0.0000	0.0064	0.0286	0.0267	0.0129
A_8	0.0060	0.0069	0.0115	0.0272	0.0343	0.0189	0.1186	0.0557	0.0257	0.0108
A_9	0.0093	0.0104	0.0115	0.0260	0.0002	0.1349	0.0443	0.0072	0.0269	0.0124
A_{10}	0.0097	0.0119	0.0115	0.0251	0.0002	0.0000	0.0012	0.0457	0.0281	0.0111
A_{11}	0.0108	0.0025	0.0115	0.0248	0.0002	0.0452	0.0159	0.0570	0.0264	0.0109
A_{12}	0.0069	0.0060	0.0115	0.0242	0.0009	0.0000	0.0094	0.0264	0.0265	0.0129
A_{13}	0.0076	0.0024	0.0115	0.0231	0.0002	0.0006	0.0635	0.0154	0.0266	0.0127
A_{14}	0.0097	0.0095	0.0115	0.0224	0.0057	0.0000	0.0270	0.0255	0.0269	0.0120
A_{15}	0.0078	0.0037	0.0115	0.0218	0.0059	0.0000	0.0282	0.0019	0.0268	0.0140
A_{16}	0.0083	0.0163	0.0115	0.0218	0.0002	0.0000	0.0185	0.0482	0.0287	0.0108
A_{17}	0.0101	0.0224	0.0115	0.0209	0.0058	0.0013	0.0668	0.0676	0.0265	0.0104
A_{18}	0.0097	0.0129	0.0115	0.0207	0.0063	0.0000	0.0000	0.0161	0.0256	0.0130
A_{19}	0.0110	0.0049	0.0115	0.0203	0.0002	0.0000	0.0395	0.0581	0.0267	0.0108
A_{20}	0.0076	0.0146	0.0115	0.0197	0.0002	0.0000	0.0048	0.0092	0.0264	0.0134

Tabla 7.16.- Matriz ponderada (localización de emplazamientos de plantas fotovoltaicas)



Entre los valores ponderados se procederá a buscar el máximo y el mínimo para cada criterio o factor a lo largo de todas las alternativas. Posteriormente, se identificarán la solución ideal positiva (PIS) o negativa (NIS) según la naturaleza de cada criterio mediante los valores ideales positivo y negativo (\bar{A}^+ y \bar{A}^-) y, la separación de cada alternativa de la solución ideal positiva ($\bar{d} + \bar{A}_i^+$) y negativa ($\bar{d} - \bar{A}_i^-$). Si es un criterio a maximizar (de realce) se considerará el valor máximo como PIS y el mínimo como NIS. En el caso de criterios que influyan negativamente es decir, a minimizar, se considerará el valor mínimo PIS y el máximo NIS. Para el ejemplo propuesto los valores ideales positivo y negativo son los mostrados en la tabla 7.17.

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}
	Max.	Min.	Max.	Max.	Min.	Min.	Max.	Min.	Max.	Max.
\bar{A}^+	0.0136	0.0472	0.0002	0.0000	0.0019	0.1186	0.0287	0.0024	0.0115	0.0140
\bar{A}^-	0.0060	0.0197	0.0343	0.1349	0.0676	0.0000	0.0252	0.0224	0.0115	0.0104

Tabla 7.17.- Valores ideales positivo y negativo (localización de emplazamientos de plantas fotovoltaicas)

De forma que el PIS y el NIS (separación de cada alternativa de la solución ideal positiva y negativa respectivamente), será los indicados en la tabla 7.18.

	<i>PIS</i>	<i>NIS</i>
	$\bar{d} + \bar{A}_i^+$	$\bar{d} - \bar{A}_i^-$
A_1	0.0212	0.0115
A_2	0.0097	0.0115
A_3	0.0208	0.0115
A_4	0.0207	0.0115
A_5	0.0046	0.0115
A_6	0.0188	0.0115
A_7	0.0064	0.0115
A_8	0.0069	0.0115
A_9	0.0104	0.0115
A_{10}	0.0119	0.0115
A_{11}	0.0025	0.0115
A_{12}	0.0060	0.0115
A_{13}	0.0024	0.0115
A_{14}	0.0095	0.0115
A_{15}	0.0037	0.0115
A_{16}	0.0163	0.0115
A_{17}	0.0224	0.0115
A_{18}	0.0129	0.0115
A_{19}	0.0049	0.0115
A_{20}	0.0146	0.0115

Tabla 7.18.- PIS y NIS (localización de emplazamientos de plantas fotovoltaicas)



Finalmente, se deberá obtener la proximidad relativa para todas las alternativas ($0 < R < 1$) y en los tres casos a estudio (localización de emplazamientos de instalaciones solares fotovoltaicas, termoeléctricas y eólicas), dicha proximidad proporcionará un valor para cada alternativa de forma que aquellas alternativas que presenten un elevado valor serán las que presenten mayor capacidad para albergar una instalación de EERR.

7.5.3. Clasificación de las mejores alternativas aplicando la metodología ELECTRE-TRI en software IRIS

Retomando las 20 alternativas mejor valoradas para cada uno de los casos a estudio, se procederán a clasificar y evaluar mediante el método de decisión multicriterio ELECTRE-TRI, para ello se empleará un software denominado IRIS específicamente creado para resolver problemas de decisión multicriterio de este tipo. A través del software IRIS se clasificarán las alternativas en cuatro categorías (de forma análoga al proceso desarrollado con TOPSIS difuso) en función de la capacidad de acogida para albergar una instalación de EERR:

- Categoría 1 (C1): Regular capacidad
- Categoría 2 (C2): Buena capacidad
- Categoría 3 (C3): Muy buena capacidad
- Categoría 4 (C4): Excelente capacidad

IRIS solicitará introducir una serie de parámetros ya conocidos y otros nuevos que serán obtenidos a través de la información proporcionada por los expertos.

7.5.3.1. Entrada de datos en IRIS

Una vez iniciado el software, éste solicitará información acerca del número de alternativas a evaluar, el número de criterios asignados a dichas alternativas y el número de categorías en el que se clasificarán. Una vez introducidos los parámetros iniciales comentados, se estará en condiciones de introducir el resto de parámetros en las cuatro etapas que incorpora IRIS y que habrá que completar antes de ejecutar el proceso de cálculo.



La *primera etapa* consistirá en la introducción de los valores de los criterios asignados a las alternativas a evaluar (actions), de manera análoga al desarrollo seguido en la aplicación del método TOPSIS, se irá describiendo a modo de ejemplo el proceso de evaluación de las 20 mejores alternativas para el problema de localización de plantas fotovoltaicas ya que, para el resto de tecnologías renovables el procedimiento será idéntico. En la figura 7.22. se observa una imagen la introducción de los valores en esta primera etapa:

Action	ELow	EHigh	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	g8	g9	g10
A1	1	4	5.111	18.361	360	1869381.25	1	0	22601.24	2119.606	14.151	
A2	1	4	5	8.385	360	1459838.1391.929	1	61.837	9657.791	2070.111	16.194	
A3	1	4	6.737	17.985	360	1449796.314.162	1	0	1522.721	2118.014	17.266	
A4	1	4	3.357	17.848	360	1437455.346.053	1	21.099	4575.453	1989.463	17.195	
A5	1	4	3.6	4.011	360	1342150.5261.26	1459.918	2747.762	22572.18	2023.371	14.747	
A6	1	4	6	16.244	360	1213962.25	1	120.063	1636.483	1936.769	17.406	
A7	1	4	4.545	5.516	360	1214563.25	1	225.612	11797.93	2054.525	17.46	
A8	1	4	3	5.992	360	1076798.5641.718	1366.637	4197.019	22951.44	1976.125	14.587	
A9	1	4	4.636	8.977	360	1029892.25	9768.121	1567.614	2977.255	2072.825	16.712	
A10	1	4	4.8	10.308	360	995818.8.25	1	42.497	18814.28	2158.226	15.042	
A11	1	4	5.375	2.193	360	983920.5.25	3274.236	562.875	23507.65	2033.339	14.7	
A12	1	4	3.4	5.181	360	958597.7.152.885	1	332.863	10878.60	2037.839	17.5	
A13	1	4	3.75	2.088	360	913552.9.25	40.644	2245.642	6331.069	2049.059	17.199	
A14	1	4	4.833	8.228	360	886366.2.943.817	1	956.148	10510.57	2071.82	16.196	
A15	1	4	3.846	3.181	360	862128.8.973.374	1	997.408	769.444	2059.351	18.898	
A16	1	4	4.118	14.047	360	863065.4.25	1	653.863	19882.67	2208.933	14.56	
A17	1	4	5	19.32	360	828404.8.959.207	93.938	2364.655	27859.92	2042.074	14.035	
A18	1	4	4.833	11.154	360	821109.4.1037.921	1	0	6645.131	1969.448	17.606	
A19	1	4	5.467	4.193	360	805302.4.25	1	1398.336	23962.95	2053.331	14.576	
A20	1	4	3.75	12.634	360	779993.9.25	1	170.181	3791.356	2034.125	18.075	

Fig. 7.22.- Introducción de criterios asociados a las alternativas en IRIS

La *segunda etapa* consistirá en la fijación de parámetros (Fixed par.), en ella se introducirán los valores de los perfiles o acciones de referencia (b_h) que definen las distintas categorías así como los umbrales de preferencia, indiferencia y veto (p_j , q_j y v_j). En el ejemplo propuesto, los valores de los perfiles que definen las distintas categorías han sido proporcionados por un doctor físico con más de 10 años de experiencia en energía solar fotovoltaica (de manera similar se ha procedido con el resto de tecnologías). En la página de fijación de parámetros también se definirán las tendencias de los criterios que influyen en la decisión es decir, se indicará si los criterios son a maximizar o minimizar (figura 7.23.).



Actions	Fixed Par.	Bounds	Constraints	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	g8	g9	g10
g(b1)	2	30	225	300	10000	10000	100	15000	1200	16			
g1	1	1	3	10	10	10	75	150	12	5			
p1	4	5	3	10000	200	50	250	1000	500	10			
v1	6	15	45	200000	5500	9000	1500	14000	800	15			
g(b2)	4	20	270	1500	5000	1000	500	5000	1700	18			
g2	1	1	3	10	10	10	75	150	12	5			
p2	4	5	3	10000	200	50	250	1000	500	10			
v2	6	15	45	200000	5500	90000	1500	14000	800	15			
g(b3)	7	10	345	10000	100	100	1000	500	2000	20			
g3	1	1	3	10	10	10	75	150	12	5			
p3	4	5	3	10000	200	50	250	1000	500	10			
v3	6	15	45	200000	5500	9000	1500	14000	800	15			
MAX/min	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1

Fig. 7.23.- Fijación de parámetros en IRIS

En la *tercera etapa* se fijarán los límites (bounds) tanto del umbral de corte ($0 < \lambda < 1$) como de los pesos o coeficientes de importancia de los criterios (k_m). Cuanto más elevado sea el umbral de corte más flexible será el método es decir, mayor libertad tendrá una alternativa para estar clasificada en una u otra categoría, e incluso podría ocurrir que no hubiera alternativas clasificadas en la mejor categoría C4 (excelente capacidad de acogida para albergar una instalación de EERR), por ello se adoptará un intervalo con valores de umbral de corte elevados pero sin alcanzar la unidad ($0.67 < \lambda < 0.8$). (Figura 7.24.)

Actions	Fixed Par.	Bounds	Constraints	lambda	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9	k10
LB - Lower	0.67	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
UB - Upper	0.8	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

Fig. 7.24.- Fijación de límites en IRIS

Los pesos o coeficiente de importancia de los criterios se podrían fijar en esta etapa, no obstante únicamente se reflejará el intervalo en el que se situarían es decir, sus valores máximos y mínimos. El hecho de proceder de esta forma se debe a que los pesos de los criterios que se han obtenido en el presente capítulo proceden de una metodología multicriterio distinta (método AHP) y, a través de la encuesta que se elaboró para la obtención de los mismos resultará posible introducir una serie de restricciones que permitan que no sea necesario conocer el valor de los pesos en el software IRIS.



La cuarta etapa consistirá en la introducción de las restricciones (constraints), en esta etapa se utilizará la encuesta elaborada para obtener el peso de los criterios, concretamente la pregunta nº 2 de dicha encuesta la cual solicitaba lo siguiente:

- P2: Escriba los criterios de mayor a menor importancia

La ordenación de tales criterios permitirá crear una serie de restricciones (131 en el caso de instalaciones solares fotovoltaicas) de forma que favorecerá una clasificación consistente de las alternativas en una u otra categoría. En la figura 7.25. se observan algunas de las 131 restricciones que ha sido necesario introducir para el problema de localización de instalaciones solares fotovoltaicas.

Actions	Fixed Par.	Bounds										Constraints	RHS	
	lambda	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9	k10	<=>	RHS	
Norm	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	=	1	
ad1		-1						1				>=	0	
ad2			-1					1				>=	0	
ad3				-1				1				>=	0	
ad4					-1			1				>=	0	
ad5						-1		1				>=	0	
ad6							-1	1				>=	0	
ad7								1	-1			>=	0	
ad8								1		-1		>=	0	
ad9								1			-1	>=	0	
ad10		-1	1									>=	0	
ad11			-1	1								>=	0	
ad12			1		-1							>=	0	
ad13			1			-1						>=	0	
ad14			1						-1			>=	0	
ad15			1							-1		>=	0	
ad16			1								-1	>=	0	
ad17		-1		1								>=	0	
ad18				1	-1							>=	0	
ad19				1		-1						>=	0	
ad20				1			-1					>=	0	
ad21				1					-1			>=	0	
ad22				1						-1		>=	0	
ad23				1							-1	>=	0	
ad24		-1				1						>=	0	
ad25					-1	1						>=	0	
ad26						1	-1					>=	0	
ad27						1			-1			>=	0	
ad28						1				-1		>=	0	
ad29		-1									1	>=	0	
ad30				-1							1	>=	0	
ad31							-1				1	>=	0	
ad32									-1			1	>=	0

Fig. 7.25.- Fijación de restricciones en IRIS

Una vez finalizado las cuatro etapas se estará en condiciones de ejecutar IRIS con la finalidad de obtener la clasificación por categorías de las alternativas seleccionadas.

Los resultados obtenidos mediante los procesos descritos en el presente capítulo de esta Tesis Doctoral serán mostrados y analizados en el siguiente capítulo.



7.6. Referencias bibliográficas del Capítulo VII

- Al-Yahyai, S., Charabi, Y., Gastli, A. y Al-Badi, A., (2012). Wind farm land suitability indexing using multi-criteria analysis. *Renewable Energy*, 44, pp. 80-87.
- Arán-Carrión, J., Espín-Estrella, A., Aznar-Dols, F., Zamorano-Toro, M., Rodríguez, M., y Ramos-Ridao, A., (2008). Environmental decision-support systems for evaluating the carrying capacity of land areas: Optimal site selection for grid-connected photovoltaic power plants. *Renewable and sustainable energy reviews*. 12. pp. 2358-2380.
- Andrew, N., Arnette, A.N. y Zobel, C.W., (2011). Spatial analysis of renewable energy potential in the greater southern Appalachian mountains. *Renewable Energy*. 36. pp. 2785-2798.
- Aydin, N.Y., Kentel, E. y Duzgun, S., (2010). GIS-based environmental assessment of wind energy systems for spatial planning: A case study from Western Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, pp. 364–373.
- Barredo-Cano, J.I. y Gómez-Delgado, M., (2005). *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*. 2ª edición, ISBN 84-7897-673-6. RA-MA editorial. Madrid
- Chen S J, Hwang C L (1992) Fuzzy Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications, Springer-Verlang, Berlin.
- Delgado, M., Verdegay, J.L y Vila, M.A. (1992). Linguistic Decision Making Models. *International Journal of Intelligent Systems*. 7, pp. 479-492.
- Dubois, D. y Prade, H. (1980). *Fuzzy sets and systems: theory and applications*. New York, Academic Press Inc.
- García-Cascales, M.S. y Lamata, M.T., (2007). A modification of the index of Liou and Wang for ranking fuzzy number," *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 15. 4, pp. 411-424.
- García-Cascales, M.S. y Lamata, M.T. (2011). Multi-criteria analysis for a maintenance management problem in an engine factory: rational choice. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 22. pp.779-788.



- García-Cascales M S, Lamata M T, Sánchez-Lozano J M (2011) Evaluation of photovoltaic cells in a multi-criteria decision making process. *Annals and Operational Research*, 199, pp. 373-391.
- Gastli, A. y Charabi, Y., (2010). Siting of Large PV Farms in Al-Batinah Region of Oman. *2010 IEEE International Energy Conference*. 978-1-4244-9380-7/10.
- Hansen, H.S., (2005). GIS-based Multi-Criteria Analysis of Wind Farm Development. In: *ScanGis 2005: Proceedings of the 10th Scandinavian Research Conference on Geographical Information Science*. ed. / Hans Hauska ; Håvard Tveite. Department of Planning and Environment, 2005. pp. 75-87.
- Hwang C L, Yoon K (1981) Multiple Attribute Decision Methods and Applications. Springer, Berlin Heidelberg.
- Herrera, F., Alonso, S. Chiclana, F. y Herrera-Viedma, E. (2009). Computing with words in decision making: foundations, trends and prospects. *Fuzzy Optimization Decision Making*. 8. pp.337–364.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía IDAE. (2010). *Estudio del recurso eólico y elaboración de un mapa eólico de España*. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Madrid.
- Janke, J.R., (2010). Multicriteria GIS modeling of wind and solar farms in Colorado. *Renewable Energy*. 35. pp. 2228-2234.
- Jo, J.H. y Otanicar, T.P., (2011). A hierarchical methodology for the mesoscale assessment of building integrated roof solar energy systems. *Renewable Energy*, 36, pp. 2992-3000.
- Keeney R, Raiffa H (1976) Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs, Wiley: New York.
- Klir, G. J. y Yuan, B. (1995). *Fuzzy sets and fuzzy logic: theory and applications*. Prentice Hall.
- Lee, A.H.I., Che, H.H. y Kang, H.Y. (2009). Multi-criteria decision making on strategic selection of wind farms. *Renewable Energy*. 34. pp. 120–126.
- Luce R D, Raiffa H (1957) Games and Decisions: Introduction and Critical Survey. New York: John Wiley and Sons.
- Monteiro, C., Saraiva, J.B. y Miranda, V., (1998). Evaluation of electrification alternatives in developing countries- the SOLARGIS tool. Electrotechnical Conference, 1998. *MELECON 98*, 9th Mediterranean.



Ninyerola, M., Pons, X. y Roure, J.M. (2005). *Atlas Climático Digital de la Península Ibérica. Metodología y aplicaciones en bioclimatología y geobotánica*. ISBN 932860-8-7. Universidad Autónoma de Barcelona, Bellaterra.

Van Haren R, Fthenakis V (2011) GIS-based wind farm site selection using spatial multi-criteria analysis (SMCA):Evaluating the case for New York State. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15, pp. 3332-3340.

Saaty, T. L., (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. Ed. McGraw Hill.

Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8. pp. 338-353.

CUARTA PARTE:

RESULTADOS, CONCLUSIONES Y
LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN



CAPÍTULO VIII

RESULTADOS





*“Nunca se alcanza la verdad total,
ni nunca se está totalmente alejado de ella”.*

Aristóteles

CAPÍTULO VIII

RESULTADOS

8.1 Introducción

Una vez llevados a cabo los diferentes procesos de cálculo, en el presente capítulo se mostrarán los resultados obtenidos para cada uno de los casos analizados, éstos serán los siguientes:

- Resultados de la selección de emplazamientos óptimos de instalaciones de EERR con gvSIG
- Resultados de la evaluación de las alternativas aplicando el método TOPSIS difuso

Extrayendo las veinte mejores alternativas obtenidas mediante la aplicación de la metodología TOPSIS difusa para cada una de las tecnologías renovables (energía solar fotovoltaica, termoeléctrica y eólica), se procedió a analizar de nuevo dichas alternativas mediante la metodología TOPSIS y la metodología ELECTRE-TRI con el objetivo de, por un lado comparar ambos MCDM y por otro, analizar y estudiar las diferencias obtenidas. Por ello también se mostrarán en este capítulo los resultados obtenidos tras dicha comparación:

- Resultados de la evaluación de las alternativas seleccionadas mediante TOPSIS
- Clasificación de las alternativas seleccionadas mediante ELECTRE-TRI
- Comparación de métodos de decisión multicriterio: TOPSIS y ELECTRE-TRI



8.2 Selección de emplazamientos óptimos de instalaciones de EERR con gvSIG

8.2.1 Emplazamientos óptimos de instalaciones solares fotovoltaicas

El punto de partida será la capa final de atributos para instalaciones solares fotovoltaicas que proporcionó gvSIG; en la misma se representan los valores de los 10 criterios que influyen en la decisión para la totalidad (66.845) de alternativas a evaluar.

Se establecerá como punto de partida la clasificación por categorías proporcionada por los expertos, ésta permitirá clasificar cada una de las alternativas en una categoría dada según presente mejor o peor disposición para albergar una instalación de EERR:

- Categoría 1: Regular capacidad
- Categoría 2: Buena capacidad
- Categoría 3: Muy buena capacidad
- Categoría 4: Excelente capacidad

Mediante consulta con expertos se procederá a definir los límites de cada una de dichas categorías en función de cada criterio (tabla 8.1.):

<i>Criterios</i>	<i>Categoría 1</i>	<i>Categoría 2</i>	<i>Categoría 3</i>	<i>Categoría 4</i>
C ₁ : Cap. agrológica (Clases)	$0 < A_i < 2$	$2 \leq A_i < 4$	$4 \leq A_i < 7$	$7 \leq A_i < 8$
C ₂ : Pendiente del terreno (%)	$A_i > 30$	$30 \geq A_i > 20$	$20 \geq A_i > 10$	$A_i \leq 10$
C ₃ : Orientación del terreno (°)	$45 \leq A_i < 135$	$135 \leq A_i < 225$	$315 \leq A_i < 360$ $0 \leq A_i < 45$	$225 \leq A_i < 315$
C ₄ : Área de la parcela (m ²)	$A_i < 300$	$300 \leq A_i < 1500$	$1500 \leq A_i < 10000$	$A_i \geq 10000$
C ₅ : Distancia a carreteras (m)	$A_i > 10000$	$10000 \geq A_i > 5000$	$5000 \geq A_i > 100$	$A_i \leq 100$
C ₆ : Dist. redes eléctricas (m)	$A_i > 10000$	$10000 \geq A_i > 1000$	$1000 \geq A_i > 100$	$A_i \leq 100$
C ₇ : Dist. núcleos población (m)	$A_i > 100$	$100 \leq A_i < 500$	$500 \leq A_i < 1000$	$A_i \geq 1000$
C ₈ : Dist. subestaciones (m)	$A_i > 15000$	$15000 \geq A_i > 5000$	$5000 \geq A_i > 500$	$A_i \leq 500$
C ₉ : Radiación solar (kJ·m ² /día)	$A_i > 1200$	$1200 \leq A_i < 1700$	$1700 \leq A_i < 2000$	$A_i \geq 2000$
C ₁₀ : Temperatura media (°C)	$A_i < 16$	$16 \leq A_i < 18$	$18 \leq A_i < 20$	$A_i \geq 20$

Tabla 8.1.- Límites de categorías para cada criterio que influye en el problema de decisión (localización de instalaciones solares fotovoltaicas)



Para el caso de instalaciones solares fotovoltaicas se adoptarán como puntos de partida los límites indicados en la tabla anterior y se comenzará a aplicar el software gvSIG.

Con el objetivo de ser restrictivos desde el comienzo, se procederá a eliminar aquellas alternativas que tengan uno o más criterios situados en las categorías 1 y 2 por ello, el primer paso en el proceso de selección consistirá en eliminar, mediante la herramienta filtro de gvSIG, aquellas alternativas que presenten valores en alguno de sus criterios inferiores a los límites de la categoría 3 es decir, aquellas alternativas que permitan obtener capacidades de acogida muy buenas o excelentes o que tengan uno o más criterios situados en categorías inferiores a la Categoría 3 (Categorías 1 y 2). Tales valores se muestran en la tabla 8.2.

<i>Localización de instalaciones solares fotovoltaicas</i>	
<i>Atributos (criterios)</i>	<i>Valores límite en Categoría 3</i>
Área	$\geq 1.500 \text{ m}^2$
Distancia a núcleos de población	$\geq 500 \text{ m}$
Distancia a subestaciones transformadoras	$\leq 5.000 \text{ m}$
Distancia a principales carreteras	$\leq 5.000 \text{ m}$
Distancia a redes eléctricas	$\leq 1.000 \text{ m}$
Capacidad agrológica	$\geq 4,00$
Pendiente	$\leq 20 \%$
Potencial de Radiación Solar	$\geq 1.700 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{día}$
Temperatura (*)	$\geq 18 \text{ }^\circ\text{C}$
Orientación	$0^\circ\text{-}45^\circ \text{ y } 225^\circ\text{-}360^\circ$

(*)Debido a la escasa variación de valores de este atributo, no se tendrá en cuenta en el proceso de filtrado con el objetivo de evitar el descarte de alternativas válidas

Tabla 8.2.- Valores límite de los criterios situados en la categoría 3 (localización de instalaciones solares fotovoltaicas)

Una vez realizado el primer filtrado se observa (figura 8.1.) que las 66.845 alternativas iniciales, se han reducido a 2.041 alternativas.

Continuando con el proceso de selección, se procederá a aplicar un nuevo filtrado, considerando de nuevo como base la clasificación por categorías (proporcionada por los expertos). Con el objetivo de comprobar si hay alternativas con la totalidad de criterios

situados en la mejor categoría (excelente capacidad de acogida), se probará a eliminar aquellas alternativas que presenten valores (para la totalidad de criterios) inferiores a los límites de la categoría superior es decir, la categoría 4. Llevando a cabo el filtrado indicado se eliminarán la totalidad de alternativas por lo que se demuestra que no hay ninguna alternativa que presente para la totalidad de criterios todos sus valores en la máxima categoría.

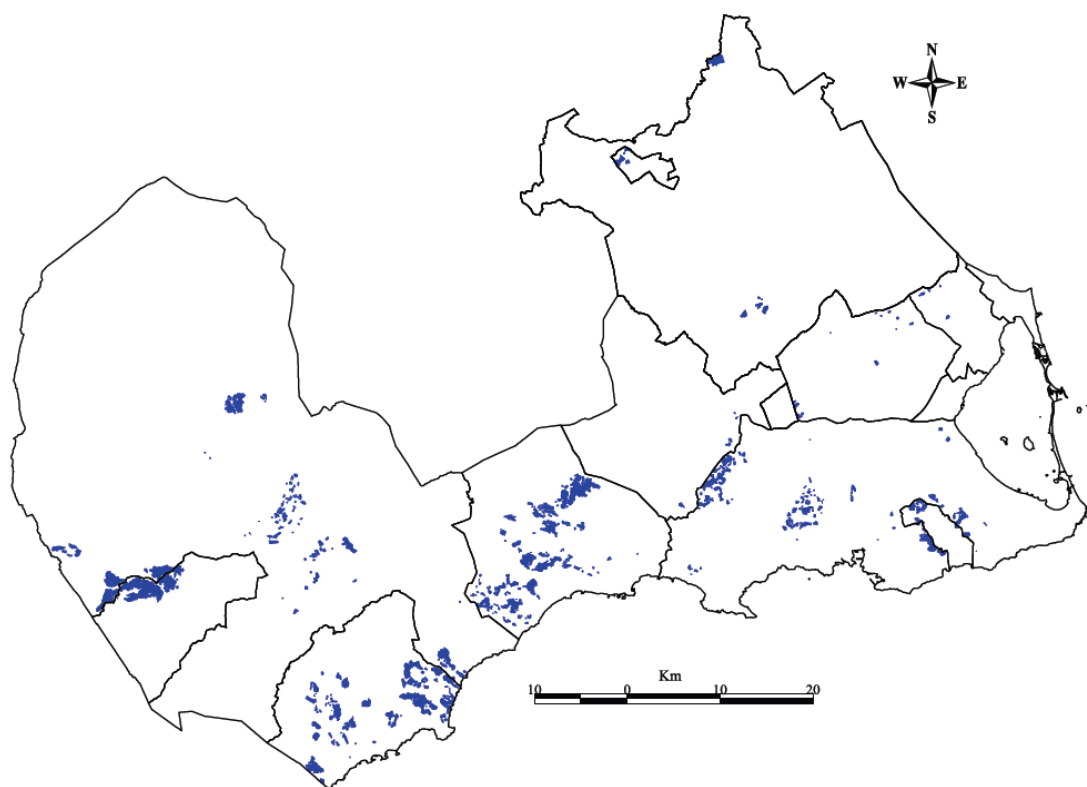


Fig. 8.1.- Alternativas resultantes tras realizar Filtrado n° 1 con gvSIG (localización de instalaciones solares fotovoltaicas)

Una vez descartada la posibilidad anterior, se modificará el enfoque en función de los criterios mejor valorados. Para esta tecnología renovable los criterios mejor valorados son: Distancias a redes de distribución, núcleos de población, subestaciones, área y radiación solar. Los valores máximos y mínimos que deben tener tales criterios para pertenecer a la categoría 4 según los expertos son los indicados en la tabla 8.3.:

<i>Localización de instalaciones solares fotovoltaicas</i>	
<i>Atributos (criterios)</i>	<i>Valores límite en Categoría 4</i>
Área	$\geq 10.000 \text{ m}^2$
Distancia a núcleos de población	$\geq 1.000 \text{ m}$
Distancia a subestaciones transformadoras	$\leq 500 \text{ m}$
Distancia a redes eléctricas	$\leq 100 \text{ m}$
Potencial de Radiación Solar	$\geq 2.000 \text{ kJ/m}^2\text{-día}$

Tabla 8.3.- Valores límite de los 5 mejores criterios situados en la categoría 4 (localización de instalaciones solares fotovoltaicas)

Tras el segundo filtrado con gvSIG en la tabla de atributos se observa que de las 2.041 alternativas obtenidas con el primer filtrado, han quedado únicamente 14 alternativas, éstas corresponden a 3 municipios (Mazarrón, Águilas y Torre-Pacheco) y su situación se muestra en la figura 8.2.

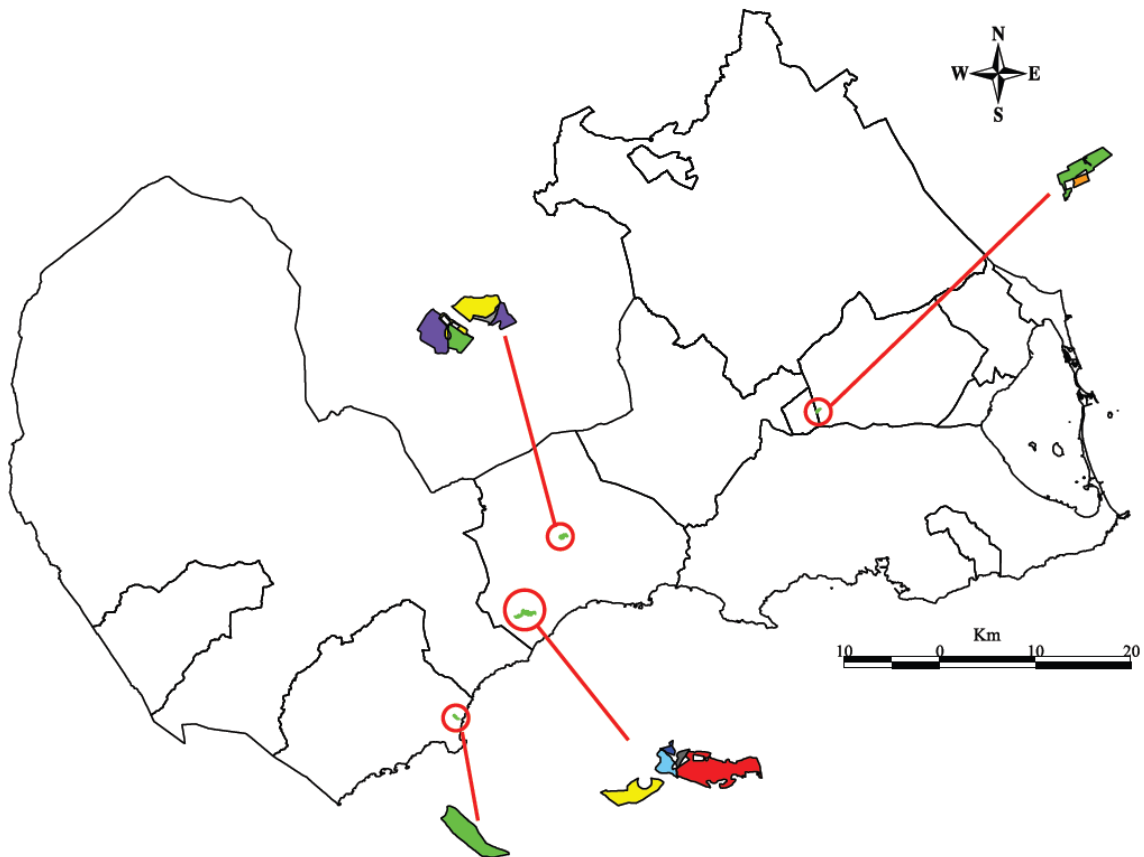


Fig. 8.2.- Alternativas resultantes tras realizar Filtrado n° 2 con gvSIG (localización de instalaciones solares fotovoltaicas)



Las características principales de las alternativas obtenidas tras los procesos de filtrado se resumen en la siguiente tabla:

<i>Municipio</i>	<i>Polígono</i>	<i>Parcela</i>	<i>Subparcela</i>	<i>Coord. X</i>	<i>Coord. Y</i>	<i>Ref. Catastral</i>
Mazarrón	052	00121	e	645270,57	4165620,79	30026A05200121
Mazarrón	052	00147	b	645389,96	4165647,34	30026A05200147
Mazarrón	052	00142	b	644719,48	4165502,81	30026A05200142
Mazarrón	052	00121	c	645076,35	4165738,05	30026A05200121
Mazarrón	049	00036	a	640781,87	4157634,79	30026A04900036
Mazarrón	049	00037	e	641019,99	4157737,20	30026A04900037
Mazarrón	052	00143	a	645006,51	4165398,12	30026A05200143
Mazarrón	049	00117	b	640853,47	4157826,31	30026A04900117
Mazarrón	052	00142	c	644871,80	4165494,28	30026A05200142
Mazarrón	049	00039	aa	641502,85	4157543,69	30026A04900039
Mazarrón	021	00109	j	640246,74	4157243,78	30026A02100109
Águilas	015	00006	ag	633719,07	4146687,37	30003A01500006
Torre-Pacheco	016	00140	l	671670,09	4178690,38	30037A01600140
Torre-Pacheco	016	00022	a	671653,49	4178803,57	30037A01600022

*Tabla 8.4.- Mejores alternativas tras procesos de filtrado en gvSIG
(localización de instalaciones solares fotovoltaicas)*

Comparando los resultados con los que proporciona la metodología TOPSIS difusa aplicada en el apartado anterior es de destacar que ninguna de las veinte mejores alternativas obtenidas con TOPSIS difuso coincide con las alternativas obtenidas mediante sucesivos filtros en gvSIG. La alternativa más próxima es la parcela 39, subparcela aa con referencia catastral 30026A04900039, dicha alternativa ocupa la posición nº 117 en TOPSIS difuso (ordenando las 66.845 alternativas de mayor a menor coeficiente R).

En cierto modo dicho resultado no resulta incoherente ya que, en la metodología TOPSIS difusa se le ha asignado un determinado peso a cada uno de los criterios que influyen en el proceso de decisión. En cambio, en el proceso de selección de alternativas mediante sucesivos filtros, no se ha asignado ningún coeficiente de importancia a cada criterio por lo que en este caso, todos los criterios presentan el mismo peso en la decisión y por tanto, es de esperar que los resultados no sean coincidentes.



Aún así, de las catorce alternativas obtenidas mediante este proceso, trece están situadas entre las 6.000 alternativas mejores (según TOPSIS difuso) de un total de 66.845 alternativas, por lo que se ha logrado reducir de forma sencilla el número de alternativas objeto de análisis.

8.2.2 Emplazamientos óptimos de instalaciones solares termoeléctricas

El punto de partida en este caso será la capa final de atributos para instalaciones solares termoeléctricas que proporcionó gvSIG, en la misma se representan los valores de los 10 criterios que influyen en la decisión para la totalidad (32.906) de alternativas a evaluar.

De modo similar a lo indicado en el caso de huertos solares fotovoltaicos se procederá para instalaciones solares termoeléctricas. Se definirá la capacidad de acogida para albergar este tipo de instalaciones en cuatro categorías (categoría 1: regular capacidad, categoría 2: buena capacidad, categoría 3: muy buena capacidad y categoría 4: excelente capacidad). Según los expertos, los límites de las categorías para cada uno de los criterios en instalaciones solares termoeléctricas son los siguientes:

<i>Criterios</i>	<i>Categoría 1</i>	<i>Categoría 2</i>	<i>Categoría 3</i>	<i>Categoría 4</i>
C_1 : Cap. agrológica (Clases)	$0 < A_i < 2$	$2 \leq A_i < 4$	$4 \leq A_i < 7$	$7 \leq A_i < 8$
C_2 : Pendiente del terreno (%)	$A_i > 20$	$20 \geq A_i > 10$	$10 \geq A_i > 5$	$A_i \leq 5$
C_3 : Orientación del terreno (°)	$45 \leq A_i < 135$	$135 \leq A_i < 225$	$315 \leq A_i < 360$ $0 \leq A_i < 45$	$225 \leq A_i < 315$
C_4 : Área de la parcela (m ²)	$A_i < 5000$	$5000 \leq A_i < 10000$	$100000 \leq A_i < 1000000$	$A_i \geq 1000000$
C_5 : Distancia a carreteras (m)	$A_i > 10000$	$10000 \geq A_i > 5000$	$5000 \geq A_i > 100$	$A_i \leq 100$
C_6 : Dist. redes eléctricas (m)	$A_i > 10000$	$10000 \geq A_i > 1000$	$1000 \geq A_i > 100$	$A_i \leq 100$
C_7 : Dist. núcleos población (m)	$A_i > 1000$	$1000 \leq A_i < 2000$	$2000 \leq A_i < 5000$	$A_i \geq 5000$
C_8 : Dist. subestaciones (m)	$A_i > 15000$	$15000 \geq A_i > 5000$	$5000 \geq A_i > 500$	$A_i \leq 500$
C_9 : Radiación solar (kJ·m ² /día)	$A_i > 1200$	$1200 \leq A_i < 1700$	$1700 \leq A_i < 2000$	$A_i \geq 2000$
C_{10} : Temperatura media (°C)	$A_i < 16$	$16 \leq A_i < 18$	$18 \leq A_i < 20$	$A_i \geq 20$

Tabla 8.5.- Límites de categorías para cada criterio que influye en el problema de decisión (localización de instalaciones solares termoeléctricas)



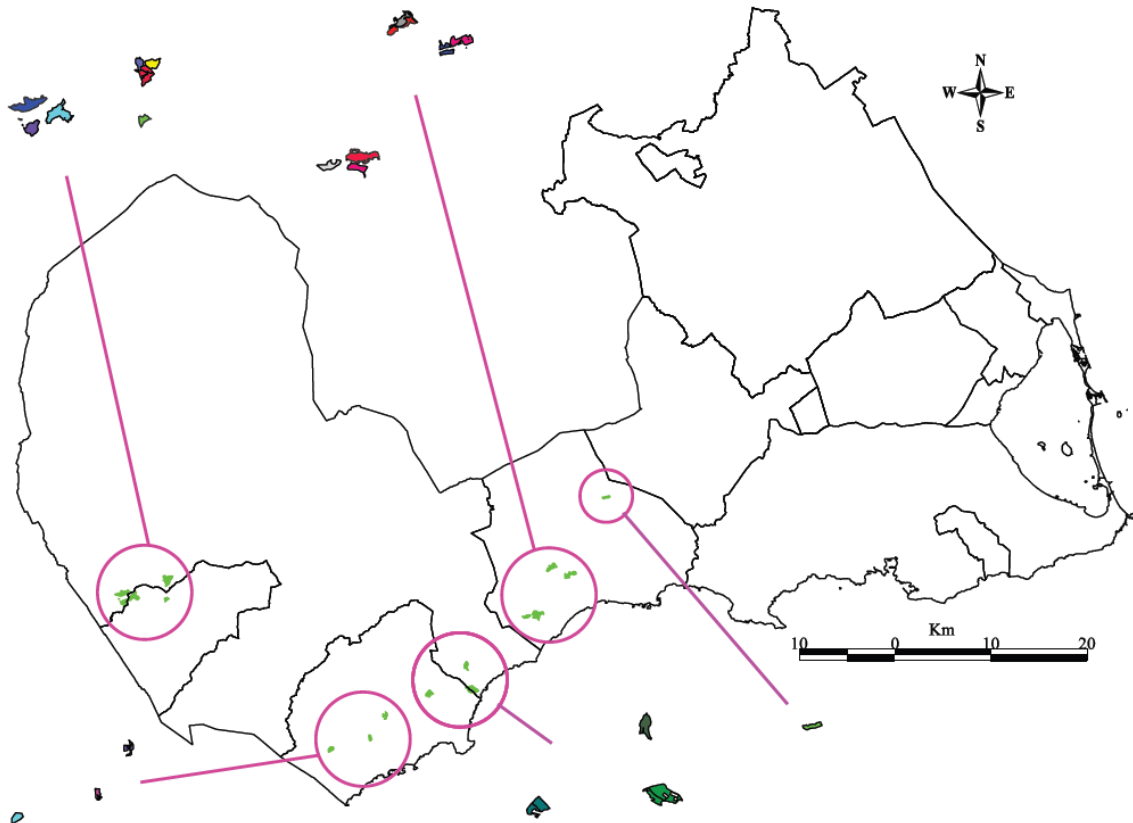
Procediendo de forma similar al problema de localización de huertos solares fotovoltaicos, se eliminará inicialmente, mediante la herramienta filtro de gvSIG, aquellas alternativas que presenten valores en alguno de sus criterios inferiores a los límites de la categoría 3 es decir, aquellas alternativas que tengan uno o más criterios situados en categorías inferiores a la categoría 3 (categorías 1 y 2). Tales valores se muestran en la tabla 8.6.

<i>Localización de instalaciones solares termoeléctricas</i>	
<i>Atributos (criterios)</i>	<i>Valores límite en Categoría 3</i>
Área	$\geq 100.000 \text{ m}^2$
Distancia a núcleos de población	$\geq 2.000 \text{ m}$
Distancia a subestaciones transformadoras	$\leq 5.000 \text{ m}$
Distancia a principales carreteras	$\leq 5.000 \text{ m}$
Distancia a redes eléctricas	$\leq 1.000 \text{ m}$
Capacidad agrológica	$\geq 4,00$
Pendiente	$\leq 10 \%$
Potencial de Radiación Solar	$\geq 1.700 \text{ kJ/m}^2\text{-día}$
Temperatura (*)	$\geq 18 \text{ }^\circ\text{C}$
Orientación	$0^\circ\text{-}45^\circ \text{ y } 225^\circ\text{-}360^\circ$

(*)Debido a la escasa variación de valores de este atributo, no se tendrá en cuenta en el proceso de filtrado con el objetivo de evitar el descarte de alternativas válidas

Tabla 8.6.- Valores límite de los criterios situados en la categoría 3 (localización de instalaciones solares termoeléctricas)

Una vez realizado el primer filtrado se observa (figura 8.3.) que las 32.906 alternativas iniciales, únicamente quedan 22 alternativas.



*Fig. 8.3.- Alternativas resultantes tras realizar Filtrado n° 1 con gvSIG
(localización de instalaciones solares termoeléctricas)*

En la figura 8.3. se observa que las alternativas seleccionadas están situadas en el sur y oeste del litoral de la Región de Murcia, concretamente en los municipios de Lorca, Mazarrón, Águilas y Puerto Lumbreras. El primer filtrado ha permitido descartar un número elevado de alternativas, no obstante se analizará la posibilidad de aplicar un segundo filtrado eliminando aquellas alternativas que presenten valores en alguno de sus criterios inferiores a los límites de la categoría superior es decir, la categoría 4. Llevando a cabo el filtrado indicado se eliminan la totalidad de alternativas ya que no hay ninguna alternativa que presente para la totalidad de criterios todos sus valores en la máxima categoría, antes de descartar realizar más procesos de filtrado se intentará al menos filtrar en función de los criterios mejor valorados, en el caso de instalaciones solares termoeléctricas los tres criterios mejor valorados son: potencial de radiación solar, distancia a subestaciones transformadoras y distancia a principales carreteras. Los valores máximos y mínimos que deben tener tales criterios para pertenecer a la categoría 4 según los expertos son los indicados en la tabla 8.7.:



<i>Localización de instalaciones solares termoeléctricas</i>	
<i>Atributos (criterios)</i>	<i>Valores límite en Categoría 4</i>
Distancia a principales carreteras	≤ 100 m
Distancia a subestaciones transformadoras	≤ 500 m
Potencial de Radiación Solar	≥ 2.000 kJ/m ² ·día

Tabla 8.7.- Valores límite de los 3 mejores criterios situados en la categoría 4 (localización de instalaciones solares fotovoltaicas)

Tras el segundo filtrado teniendo en cuenta las condiciones indicadas en la tabla 8.7. se eliminan la totalidad de las alternativas restantes es decir, las 21 alternativas se reducen a 0. Por tanto, no se volverá a realizar filtrado alguno y se estimará suficiente con el filtrado nº 1, las alternativas obtenidas en dicho filtrado se resumen en la siguiente tabla:

<i>Municipio</i>	<i>Polígono</i>	<i>Parcela</i>	<i>Subparcela</i>	<i>Coord. X</i>	<i>Coord. Y</i>	<i>Ref. Catastral</i>
Mazarrón	009	00040	i	648613,27	4169645,37	30026A00900040
Mazarrón	047	00158	e	643215,68	4162451,19	30026A04700158
Mazarrón	047	00093	a	644506,01	4161361,08	30026A04700093
Mazarrón	047	00158	b	642896,60	4162389,21	30026A04700158
Mazarrón	049	00039	aa	641502,85	4157543,69	30026A04900039
Mazarrón	021	00109	j	640246,74	4157243,78	30026A02100109
Mazarrón	047	00053	j	645104,89	4161755,85	30026A04700053
Mazarrón	049	00020	a	641326,69	4157151,11	30026A04900020
Águilas	040	00001	d	624029,44	4144724,82	30003A04000001
Águilas	041	00002	a	625608,87	4146893,06	30003A04100002
Águilas	032	00005	f	630199,71	4149206,42	30003A03200005
Águilas	024	00063	e	619938,13	4143378,37	30003A02400063
Lorca	196	00050	a	603188,43	4161261,93	30024A19600050
Lorca	210	00060	h	598475,96	4159667,27	30024A21000060
Lorca	101	00010	a	634053,38	4152051,65	30024A10100010
Lorca	099	00098	q	634633,62	4149643,09	30024A09900098
Lorca	211	00025	a	598356,77	4158714,43	30024A21100025
Lorca	196	00038	a	602664,34	4161341,26	30024A19600038
Lorca	196	00037	a	602998,74	4160853,16	30024A19600037
Puerto Lumbreras	015	00001	b	602811.92	4159085.99	30033A01500001
Puerto Lumbreras	016	00101	b	599339.50	4159257.03	30033A01600101

Tabla 8.8.- Mejores alternativas tras procesos de filtrado en gvSIG (localización de instalaciones solares termoeléctricas)



Comparando estos resultados con los que proporcionó la metodología TOPSIS difusa se llega a la misma conclusión que para el caso de huertos solares fotovoltaicos; las mejores alternativas obtenidas mediante ambos procesos no son coincidentes. En este caso la alternativa más próxima es la parcela 60 y subparcela h la cual se define con la referencia catastral 30024A21000060, dicha alternativa ocupa el puesto 92 mediante la metodología TOPSIS es decir, ordenando las 32.906 alternativas de mayor a menor coeficiente R.

La explicación radica en el hecho de que en los procesos de filtrado se han valorado todos los criterios por igual es decir, todos tienen la misma importancia mientras que para en TOPSIS difuso todas las alternativas no presentan igual importancia según los expertos.

No obstante, de las veintidós alternativas obtenidas mediante los procesos de filtrado de gvSIG, catorce están situadas entre las 1000 mejores (según TOPSIS difuso) de un total de 32.906 alternativas, por lo que se observa que aunque haya una cierta diferencia, mediante los sucesivos procesos de filtrado se logra llevar a cabo una proceso de aproximación que permite reducir de forma sencilla el número de alternativas objeto de análisis.

8.2.3 Emplazamientos óptimos de parques eólicos

Se tomará como punto de partida la capa final de atributos para el problema de localización de parques eólicos que proporcionó gvSIG; en la misma se representan los valores de los 10 criterios que influyen en la decisión para las 33.290 alternativas a evaluar.

Se volverá a utilizar a modo de referencia la clasificación por categorías (categorías 1, 2, 3 y 4) en función de la capacidad de acogida para albergar parques eólicos (excelente, muy buena, buena y regular capacidad). Los límites de dichas categorías han sido proporcionados por los expertos y se representan en la siguiente tabla:



<i>Criterios</i>	<i>Categoría 1</i>	<i>Categoría 2</i>	<i>Categoría 3</i>	<i>Categoría 4</i>
C ₁ : Cap. agrológica (Clases)	$0 < A_i < 2$	$2 \leq A_i < 4$	$4 \leq A_i < 7$	$7 \leq A_i < 8$
C ₂ : Pendiente del terreno (%)	$A_i > 50$	$50 \geq A_i > 30$	$30 \geq A_i > 15$	$A_i \leq 15$
C ₃ : Distancia a aeropuertos (m)	$A_i < 7000$	$7000 \leq A_i < 20000$	$20000 \leq A_i < 35000$	$A_i \geq 35000$
C ₄ : Área de la parcela (m ²)	$A_i < 10000$	$10000 \leq A_i < 300000$	$300000 \leq A_i < 1000000$	$A_i \geq 1000000$
C ₅ : Dist. carreteras (m)	$A_i > 5000$	$5000 \geq A_i > 2000$	$2000 \geq A_i > 500$	$A_i \leq 500$
C ₆ : Dist. redes eléctricas (m)	$A_i > 5000$	$5000 \geq A_i > 1500$	$1500 \geq A_i > 500$	$A_i \leq 500$
C ₇ : Dist. núcleos población (m)	$A_i > 1000$	$1000 \leq A_i < 2000$	$2000 \leq A_i < 5000$	$A_i \geq 5000$
C ₈ : Dist. subestaciones (m)	$A_i > 5000$	$5000 \geq A_i > 15000$	$1500 \geq A_i > 500$	$A_i \leq 500$
C ₉ : Dist. antenas (m)	$A_i < 400$	$400 \leq A_i < 1000$	$1000 \leq A_i < 4000$	$A_i \geq 4000$
C ₁₀ : Velocidad del viento (m/s)	$A_i < 3,20$	$3,20 \leq A_i < 5,50$	$5,50 \leq A_i < 7,00$	$A_i \geq 7,00$

Tabla 8.9.- Límites de categorías para cada criterio (localización de parques eólicos)

A continuación se procederá a aplicar el filtrado con el software gvSIG y, con el objetivo de seguir siendo restrictivos se eliminarán aquellas alternativas que tengan uno o más criterios situados en las categorías inferiores a la categoría 3, es decir se eliminarán aquellas alternativas que presente regular o buena capacidad de acogida de parques eólicos para alguno de sus criterios. Los límites por tanto de dicha categoría serán los mostrados en la siguiente tabla:

<i>Localización de parques eólicos</i>	
<i>Atributos (criterios)</i>	<i>Valores límites en Categoría 3</i>
Área	$\geq 300.000 \text{ m}^2$
Distancia a núcleos de población	$\geq 2.000 \text{ m}$
Distancia a subestaciones transformadoras	$\leq 1.500 \text{ m}$
Distancia a principales carreteras	$\leq 2.000 \text{ m}$
Distancia a redes eléctricas	$\leq 1.500 \text{ m}$
Distancia a principales aeropuertos	$\geq 20.000 \text{ m}$
Distancia a antenas	$\geq 1.000 \text{ m}$
Capacidad agrológica	$\geq 4,00$
Velocidad del viento	$\geq 5,50 \text{ m/s}$
Pendiente	$\leq 30 \%$

Tabla 8.10.- Valores límite de los criterios situados en la categoría 3 (localización de parques eólicos)

Llevando a cabo dicho filtrado se observa (figura 8.4.) que se han eliminado la mayoría de alternativas quedando únicamente 2 alternativas, tales alternativas se sitúan en el municipio de Águilas y sus principales características se resumen en la siguiente tabla:

<i>Municipio</i>	<i>Polígono</i>	<i>Parcela</i>	<i>Subparcela</i>	<i>Coord. X</i>	<i>Coord. Y</i>	<i>Ref. Catastral</i>
Águilas	044	00012	a	623573,00	4147258,04	30003A04400012
Águilas	045	00019	h	624763,00	4149198,21	30003A04500019

Tabla 8.11.- Mejores alternativas tras filtrado N° 1 en gvSIG (localización de parques eólicos)

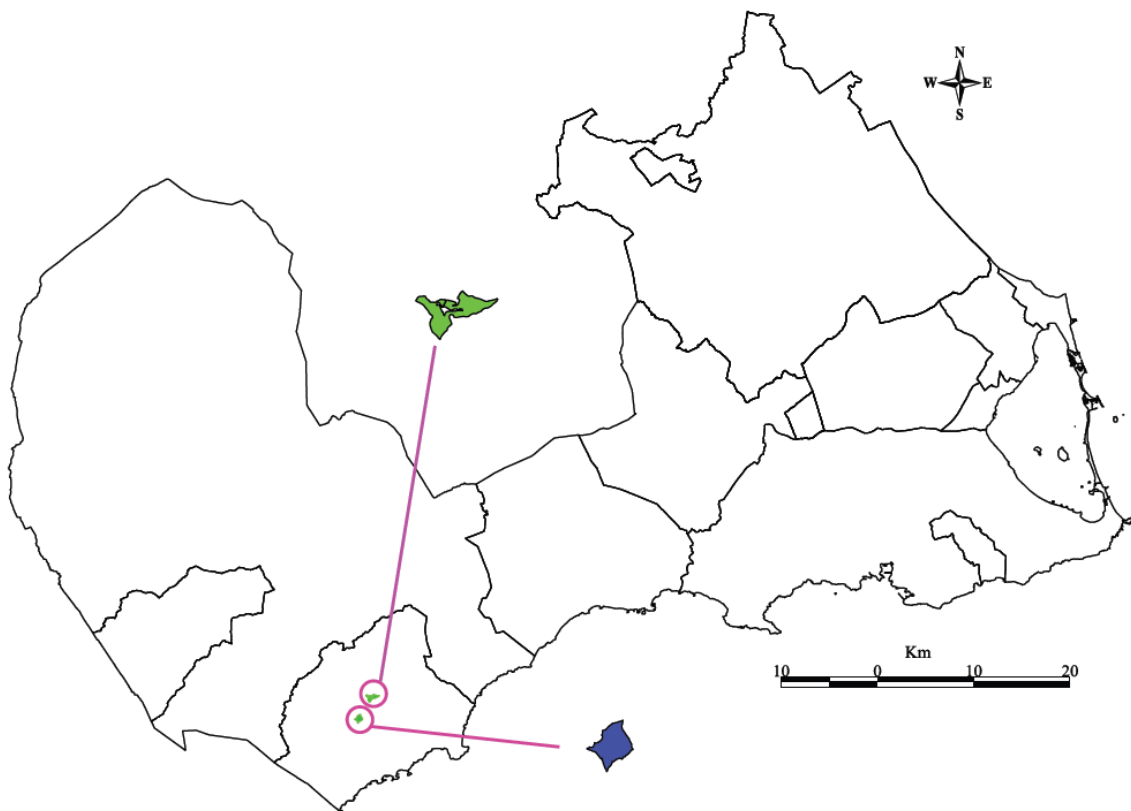


Fig. 8.4.- Alternativas resultantes tras realizar Filtrado n° 1 con gvSIG (localización de parques eólicos)

Debido a que con el segundo filtrado se han descartado prácticamente la totalidad de las alternativas, se repetirá de nuevo el filtrado pero sin ser tan restrictivo por ello a continuación se procederá a eliminar aquellas alternativas que presenten valores en alguno de sus criterios inferiores a los límites de la categoría 2 es decir, se eliminarán aquellas alternativas que tengan uno o más criterios situados en la categoría 1. Tales valores se muestran en la tabla 8.12.

<i>Localización de parques eólicos</i>	
<i>Atributos (criterios)</i>	<i>Valores límite en Categoría 2</i>
Área	$\geq 10.000 \text{ m}^2$
Distancia a núcleos de población	$\geq 1.000 \text{ m}$
Distancia a subestaciones transformadoras	$\leq 5.000 \text{ m}$
Distancia a principales carreteras	$\leq 5.000 \text{ m}$
Distancia a redes eléctricas	$\leq 5.000 \text{ m}$
Distancia a principales aeropuertos	$\geq 7.000 \text{ m}$
Distancia a antenas	$\geq 400 \text{ m}$
Capacidad agrológica	$\geq 2,00$
Velocidad del viento	$\geq 3,2 \text{ m/s}$
Pendiente	$\leq 50 \%$

Tabla 8.12.- Valores límite de los criterios situados en la categoría 2 (localización de parques eólicos)

Una vez realizado este segundo filtrado se observa (figura 8.5.) que las 33.290 alternativas iniciales se han reducido a 3.670 alternativas.

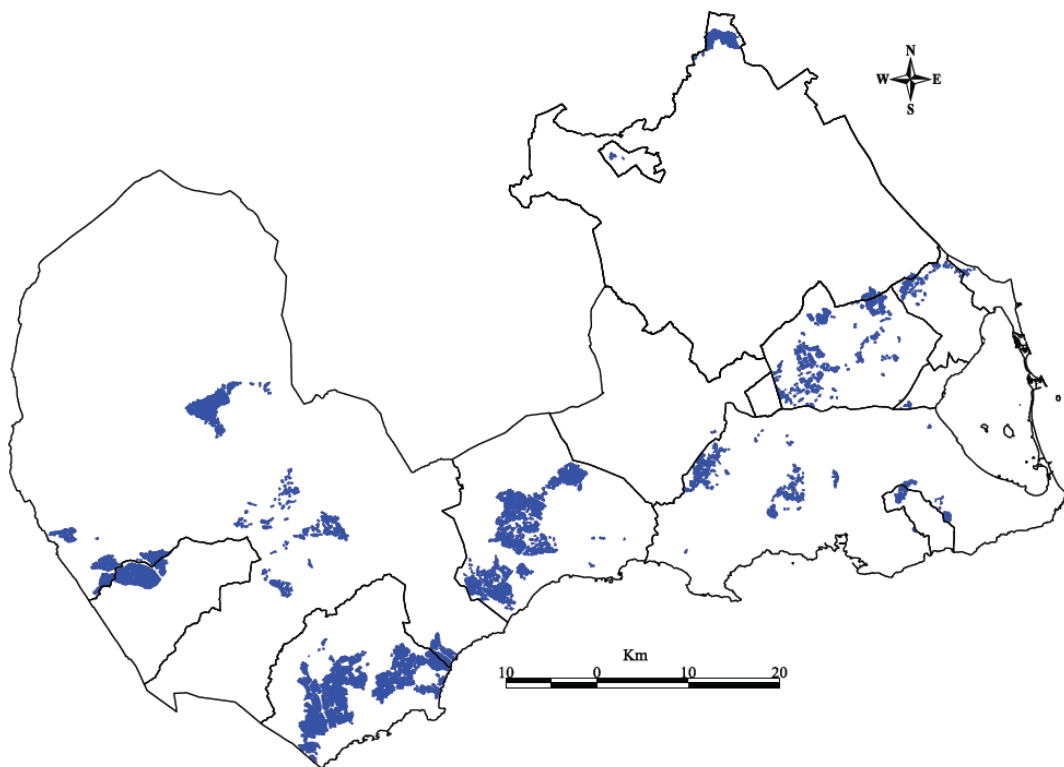


Fig. 8.5.- Alternativas resultantes tras realizar Filtrado nº 2 con gvSIG (localización de parques eólicos)



Continuando con el proceso de selección, se procederá a aplicar un nuevo filtrado pero, en este caso se filtrará en función de los criterios que presentan mayores coeficientes de importancia en el problema de decisión. Dado que en el caso de localización de parques eólicos, el criterio de velocidad de viento juega un papel fundamental (presenta una importancia muy superior al resto de criterios), se procederá a realizar un nuevo filtrado eliminando aquellas alternativas que tengan una velocidad de viento inferior a 7 m/s (emplazamientos que presenten velocidades de viento por encima de ese valor son muy adecuados para implantar parques eólicos). Aplicando dicho filtrado se reducen las 3.670 alternativas a únicamente 12 cuya situación se refleja en la figura 8.6 y sus características se resumen en la tabla 8.13.

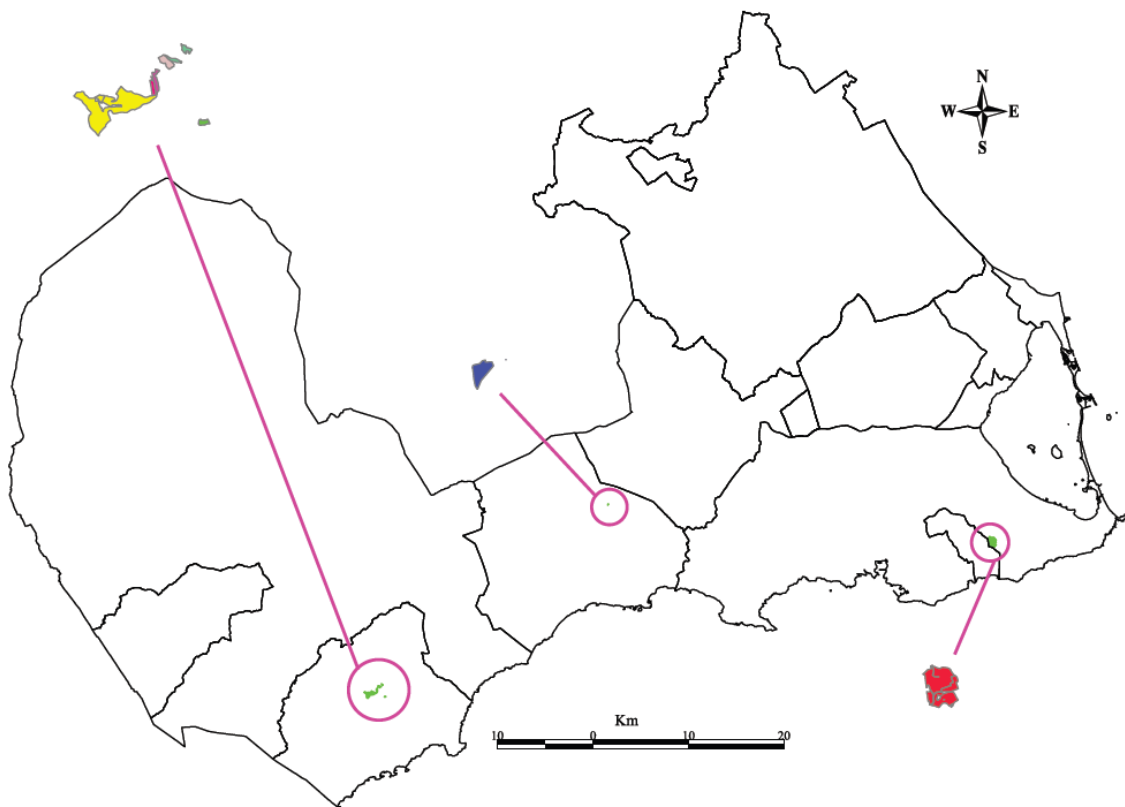


Fig. 8.6.- Alternativas resultantes tras filtrar en función de la velocidad de viento (localización de parques eólicos)



<i>Municipio</i>	<i>Polígono</i>	<i>Parcela</i>	<i>Subparcela</i>	<i>Coord. X</i>	<i>Coord. Y</i>	<i>Ref. Catastral</i>
Mazarrón	035	00023	g	649758,50	4169166,22	30026A03500023
Águilas	045	00046	a	625914,66	4150167,56	30003A04500046
Águilas	045	00036	a	626150,44	4150357,69	30003A04500036
Águilas	045	00056	b	625624,97	4149799,18	30003A04500056
Águilas	045	00019	h	624763,00	4149198,21	30003A04500019
Águilas	045	00053	d	625568,05	4149743,59	30003A04500053
Águilas	045	00047	a	625805,53	4150152,33	30003A04500047
Águilas	045	00064	p	626756,61	4149122,60	30003A04500064
Cartagena	046	00005	c	689639,11	4164985,22	51016A04600005
Cartagena	046	00004	a	690157,78	4164645,00	51016A04600004
Cartagena	046	00005	a	689855,48	4165483,77	51016A04600005
Cartagena	046	00031	a	690181,63	4165232,43	51016A04600031

Tabla 8.13.- Alternativas resultantes tras filtrar en función de la velocidad de viento (localización de parques eólicos)

Llevando a cabo de nuevo un proceso de comparación entre los resultados aquí obtenidos y los que proporcionó la metodología TOPSIS difusa se llega a la conclusión de que las mejores alternativas obtenidas mediante ambos procesos no son coincidentes. En este caso la alternativa más próxima es la parcela 19 y subparcela h la cual se define con la referencia catastral 30003A04500019, dicha alternativa ocupa el puesto 100 en de un total de 33.290 alternativas según el método TOPSIS difuso.

No obstante, en este caso, las alternativas obtenidas mediante los procesos de filtrado están situadas de forma dispersa según la metodología TOPSIS, por ejemplo; de las doce mejores alternativas obtenidas mediante filtros, hay ocho que están situadas entre las posiciones 15.000 y 30.000 (siendo el total: 33.290 alternativas). Por tanto, no sólo las alternativas no son coincidentes sino que además tampoco se consigue reducir su número. La causa de dicha diferencia radica en el hecho de que para este caso particular, se ha sido muy riguroso ya que se ha llevado a cabo el proceso de filtrado otorgando una gran importancia a un determinado criterio (velocidad de viento), dejando por tanto fuera del proceso de selección aquellas alternativas que aún estando bien valoradas en el resto de criterios no presentan valores elevados en dicho criterio.



8.3 Evaluación de las alternativas aplicando el método TOPSIS difuso

8.3.1 Evaluación de las alternativas para albergar instalaciones solares fotovoltaicas

Como resultado del proceso de defuzzificación llevado a cabo al ejecutar la regla de decisión se obtendrá para cada alternativa una determinada puntuación denominado Coeficiente R el cual permitirá valorar las diferentes alternativas analizadas.

En el caso de evaluación de alternativas para albergar huertos solares fotovoltaicos, se analizaron 66.845 alternativas y, mediante la metodología TOPSIS difusa se obtuvo un Coeficiente R para cada una de dichas alternativas.

Los resultados definidos mediante dicho coeficiente, serán introducidos en gvSIG en un campo de la tabla de atributos que define la capa temática final de posibles emplazamientos para albergar instalaciones solares fotovoltaicas, en la misma también se reflejarán los valores de los criterios que han influido en la decisión para la totalidad de alternativas y, las referencias catastrales (junto con el número de parcela y subparcela) que permitirán identificar cada una de las alternativas a evaluar.

Para la visualización de la capa final de instalaciones solares fotovoltaicas se utilizará una leyenda que clasifica los valores del coeficiente R en 4 grupos en función de su capacidad de acogida vinculada a un código de colores (excelente: azul, muy buena: verde, buena: amarillo y regular: rojo). La solución obtenida se muestra en la figura 8.1., utilizando como fondo la capa temática del litoral de la Región de Murcia con el objetivo de poder situar con mayor claridad las alternativas evaluadas.

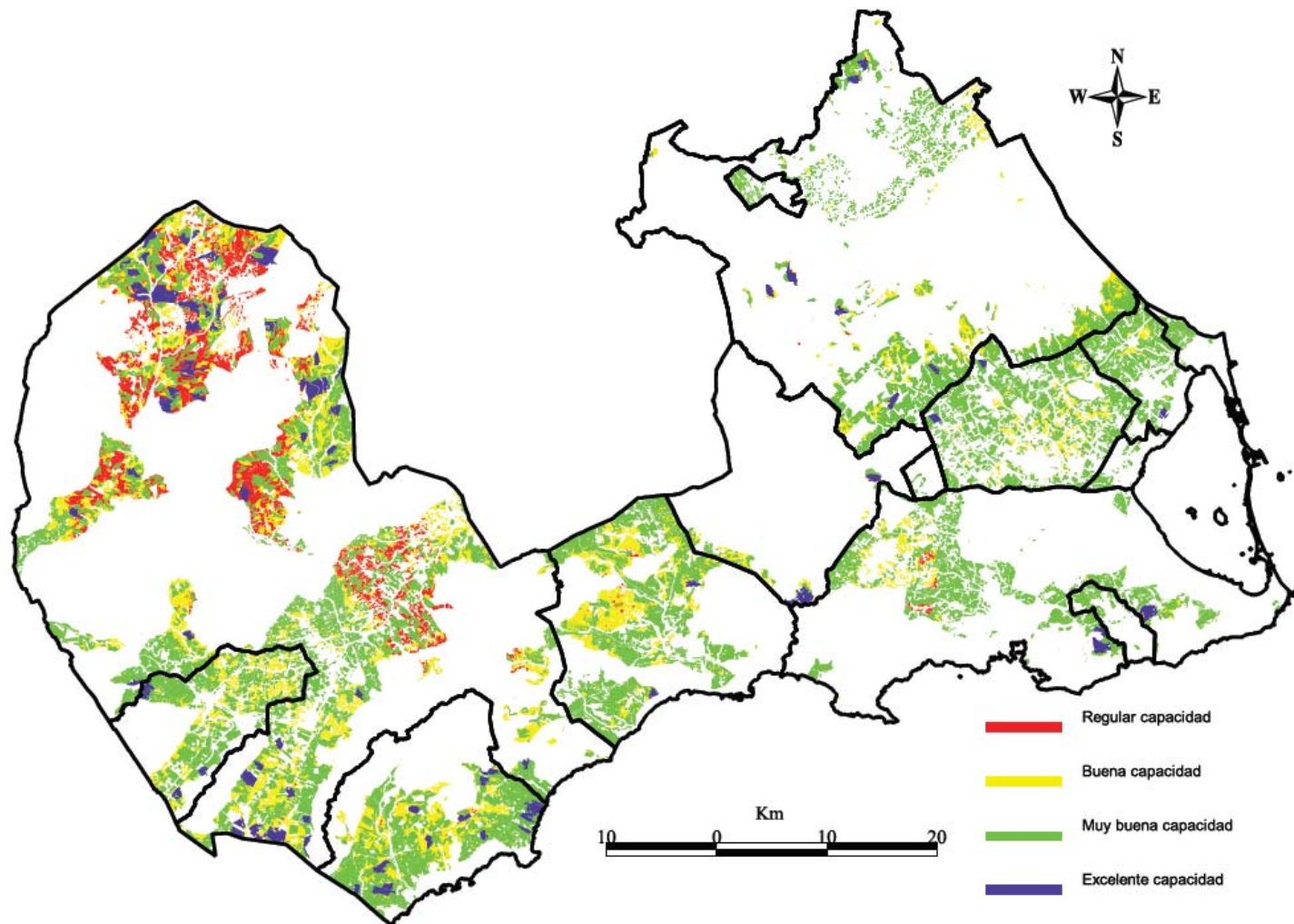


Fig. 8.7.- Mapa de capacidad de acogida de instalaciones solares fotovoltaicas en el litoral de la Región de Murcia



En el capítulo VI se obtuvo lo siguiente: de la totalidad del territorio que abarca el litoral de la Región de Murcia (4.456,59 km²), un 21,25 % de dicha superficie es adecuada para implantar huertos solares fotovoltaicos, dicho porcentaje corresponde a 947,11 km². Analizando la tabla de atributos de la capa temática final del presente capítulo se observa que:

- El 6,35 % (60,14 km²) de la superficie apta (947,11 km²), resulta excelente para construir instalaciones solares fotovoltaicas.
- El 62,65 % (593,35 km²) de la superficie apta (947,11 km²), presenta muy buena capacidad de acogida para albergar este tipo de instalaciones.
- El 21,74 % (205,89 km²) de la superficie apta (947,11 km²), presenta buena capacidad de acogida.
- El 9,26 % (87,73 km²) de la superficie apta (947,11 km²), presenta regular capacidad de acogida.

En la figura 8.8. se muestra, del total de la superficie óptima del litoral de la Región de Murcia para albergar instalaciones solares termoeléctricas, cuales son los porcentajes de capacidad de acogida para llevar a cabo su implantación.

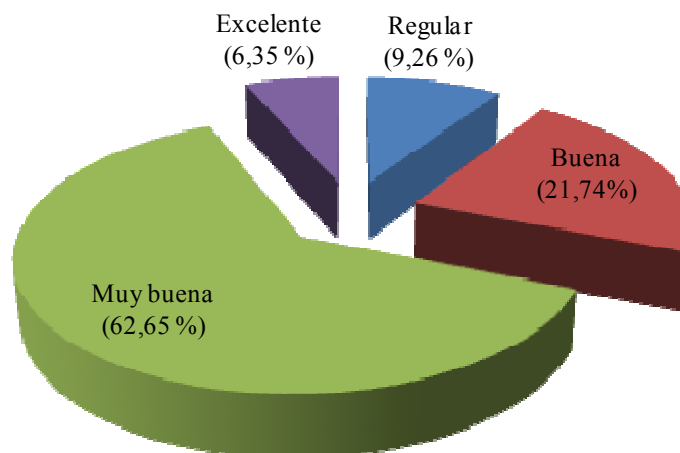


Fig. 8.8.- Distribución de la capacidad de acogida en la superficie disponible del litoral para albergar instalaciones solares fotovoltaicas

Aplicando diferentes comandos de gvSIG en la tabla de atributos de dicha capa temática se obtendrán la mejor y la peor alternativa. Ambas están situadas en el oeste del litoral,



concretamente en el municipio de Lorca, la peor alternativa presenta un ranking de valor 0,081579 que corresponde con la referencia catastral 30024A25300040, parcela 40 y subparcela h. En cambio la mejor alternativa dispone de un ranking de valor 0,858093 el cual corresponde con la referencia catastral 30024A01400008 parcela 8 y subparcela f.

De forma análoga al proceso de visualización de resultados desarrollado en este apartado se procederá a representar la evaluación de emplazamientos óptimos para albergar instalaciones solares termoeléctricas y parques eólicos.

8.3.2 Evaluación de las alternativas para albergar instalaciones solares termoeléctricas

De igual modo a lo indicado en el apartado anterior, el proceso de defuzzificación permitirá obtener EL coeficiente R que valorará las diferentes alternativas que, para el caso de instalaciones solares termoeléctricas, serán 32.906 alternativas.

Se clasificarán los emplazamientos óptimos en función de su capacidad para albergar instalaciones de esta índole vinculada al mismo código de colores utilizado en instalaciones solares fotovoltaicas es decir, la capacidad de acogida excelente se representará de color azul, si es muy buena el color será verde, en el caso de que una alternativa presente una buena capacidad, ésta se identificará con el color amarillo y finalmente si únicamente es regular su color será el rojo.

Recurriendo de nuevo al empleo como fondo de la capa temática del litoral, la solución obtenida se muestra en la figura 8.9.

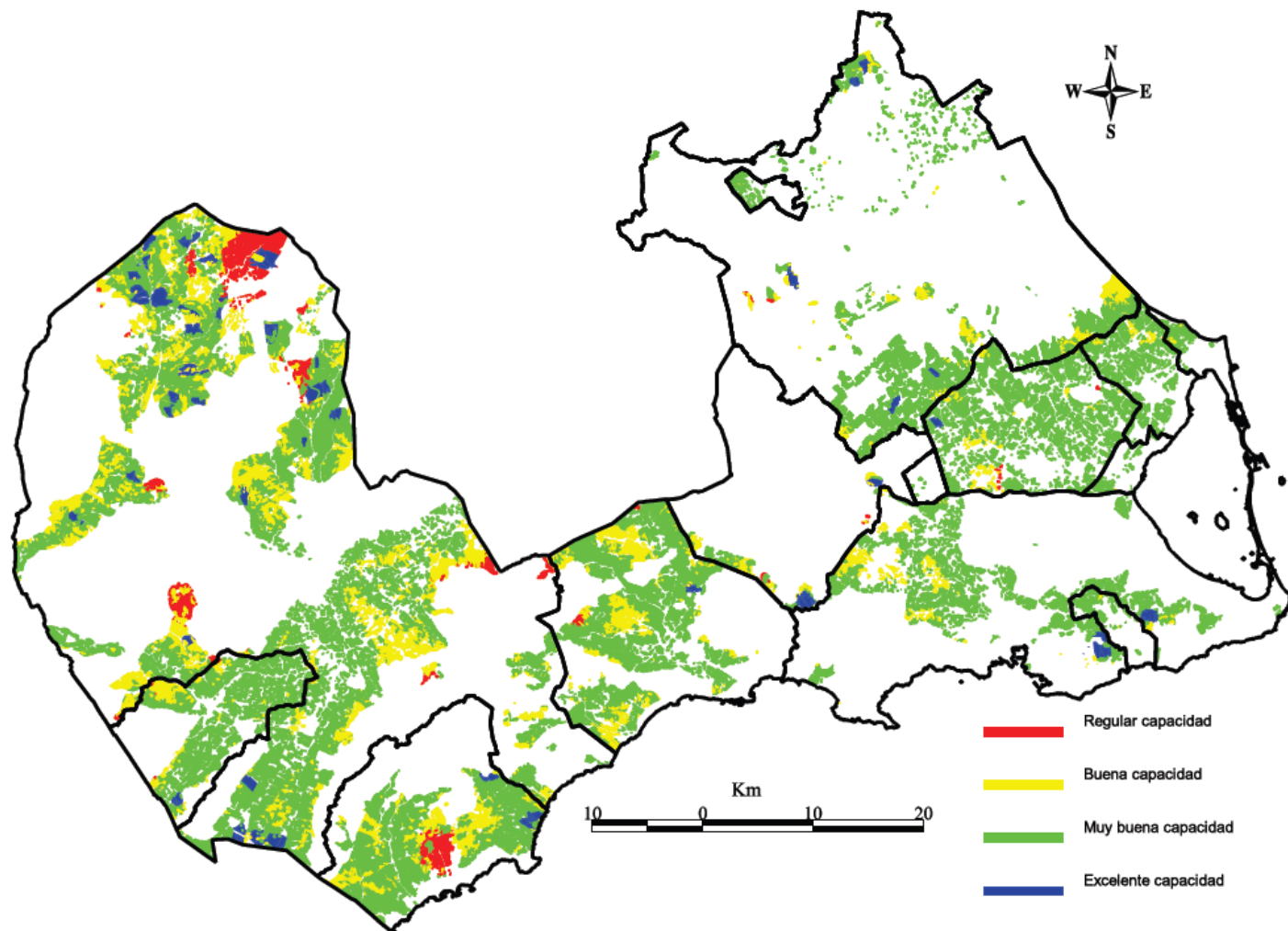


Fig. 8.9.- Mapa de capacidad de acogida de instalaciones solares termoeléctricas en el litoral de la Región de Murcia

En el capítulo VI se obtuvo lo siguiente: de la totalidad del territorio que abarca el litoral de la Región de Murcia (4.456,59 km²), un 19,32 % de dicha superficie es adecuada para implantar instalaciones solares termoeléctricas, dicho porcentaje corresponde a 861,01 km². Analizando la tabla de atributos de la capa temática final del presente capítulo se observa que:

- El 4,69 % (40,38 km²) de la superficie apta (861,01 km²), resulta excelente para construir instalaciones solares termoeléctricas.
- El 73,02 % (628,69 km²) de la superficie apta (861,01 km²), presenta muy buena capacidad de acogida para albergar este tipo de instalaciones.
- El 18,85 % (162,31 km²) de la superficie apta (861,01 km²), presenta buena capacidad de acogida.
- El 3,44 % (29,63 km²) de la superficie apta (861,01 km²), presenta regular capacidad de acogida.

De forma análoga al estudio de superficies aptas para huertos solares fotovoltaicos, en la figura 8.10. se muestra, del total de la superficie óptima del litoral de la Región de Murcia para albergar instalaciones solares termoeléctricas, cuales son los porcentajes de capacidad de acogida para llevar a cabo su implantación.

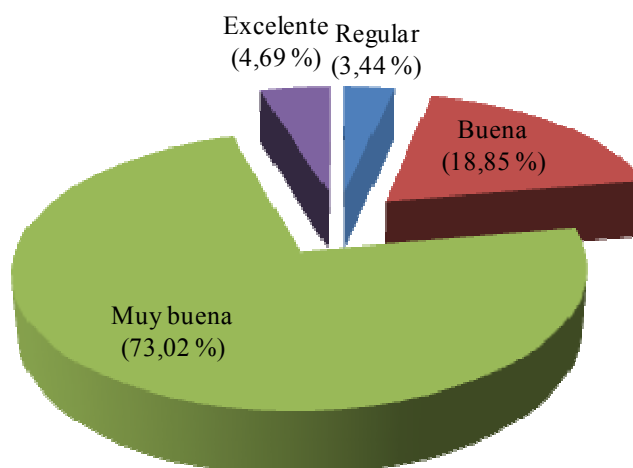


Fig. 8.10.- Distribución de la capacidad de acogida en la superficie disponible del litoral para albergar instalaciones solares termoeléctricas



Aplicando diferentes comandos de gvSIG en la tabla de atributos de la capa temática final para instalaciones solares termoeléctricas se obtendrán la mejor y la peor alternativa. En este caso están situadas en diferentes municipios. Hay dos emplazamientos que presentan el menor valor del coeficiente R ($R=0,1491$) existiendo por tanto dos peores alternativas, están situadas en el norte del municipio de Mazarrón y corresponden a la referencia catastral 30026A00500049, parcela 49 subparcela f por un lado y a la referencia catastral 30026A00500050, parcela 50, subparcela a por otro. La mejor alternativa ($R=0,9141$) está situada en el municipio de Lorca y corresponde con la referencia catastral 30024A01400008 y subparcela f.

8.3.3 Evaluación de las alternativas para albergar parques eólicos

El número total de alternativas (parcelas y subparcelas) a evaluar para el caso de de instalaciones solares termoeléctricas es similar al problema de localización de emplazamientos óptimos para implantar parques eólicos, en este último caso se valorarán 33.290 alternativas.

Los emplazamientos óptimos para el caso de parques eólicos se clasificarán de igual forma a lo indicado en anteriores apartados es decir, en función de su capacidad para albergar este tipo instalaciones vinculada al mismo código de colores definido en aparados anteriores. Se continuará utilizando como fondo la capa temática del litoral y, la solución obtenida se muestra en la figura 8.11.

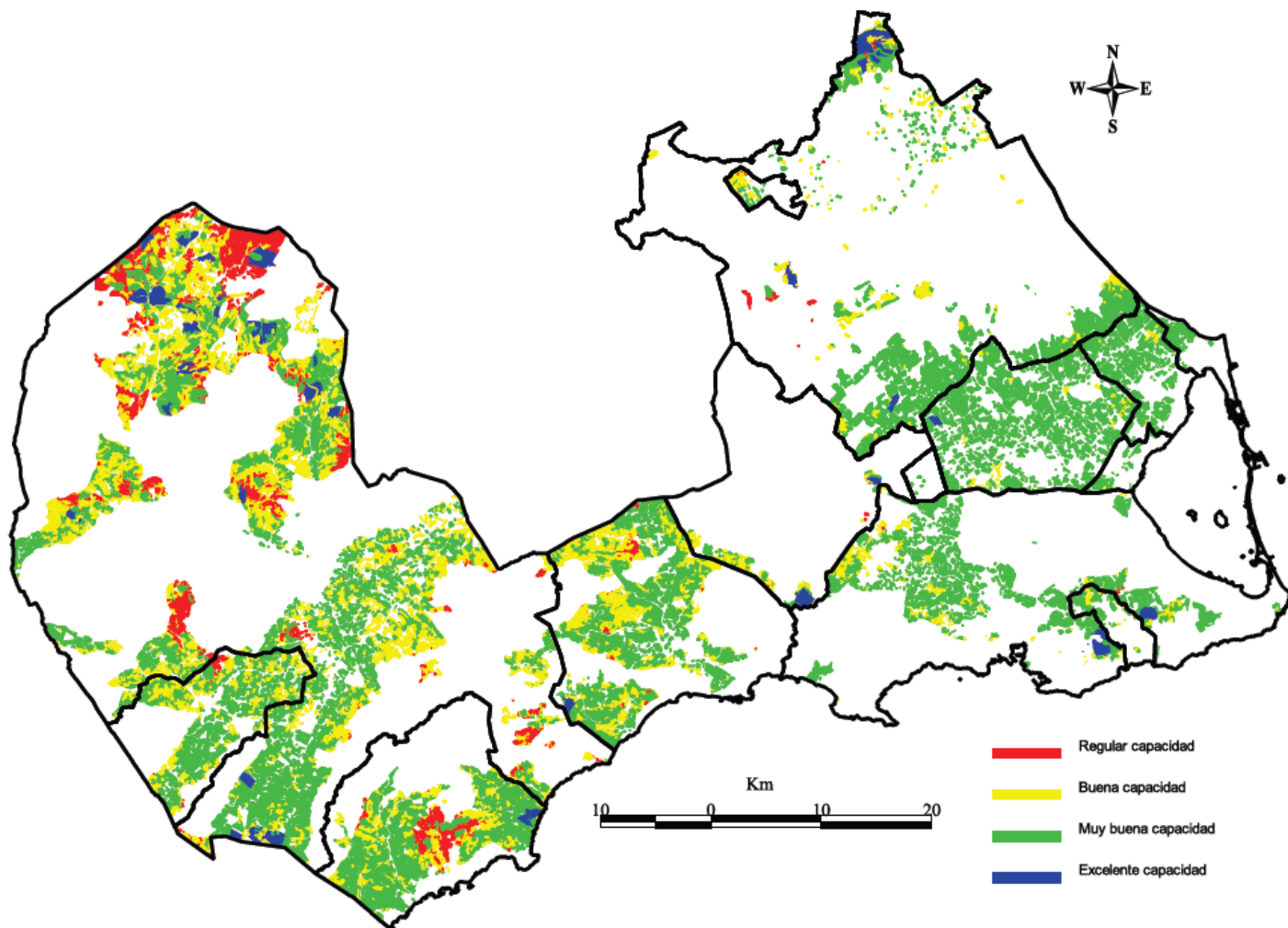


Fig. 8.11.- Mapa de capacidad de acogida de parques eólicos en el litoral de la Región de Murcia

En el capítulo VI se obtuvo el porcentaje de superficie óptima para albergar parques eólicos en el litoral de la Región de Murcia, éste alcanzaba el valor de 19,94 % el cual correspondía con 888,75 km² de superficie del total del litoral (4.456,59 km²). Analizando la tabla de atributos de la capa temática final del presente capítulo se observa lo siguiente:

- El 4,61 % (40,99 km²) de la superficie apta (888,75 km²), resulta excelente para construir parques eólicos.
- El 61,80 % (549,26 km²) de la superficie apta (888,75 km²), presenta muy buena capacidad de acogida para albergar este tipo de instalaciones.
- El 26,18 % (232,68 km²) de la superficie apta (888,75 km²), presenta buena capacidad de acogida.
- El 7,41 % (65,82 km²) de la superficie apta (888,75 km²), presenta regular capacidad de acogida.

En la figura 8.12. se muestra, del total de la superficie óptima del litoral de la Región de Murcia para albergar parques eólicos, cuales son los porcentajes de capacidad de acogida para llevar a cabo su implantación.

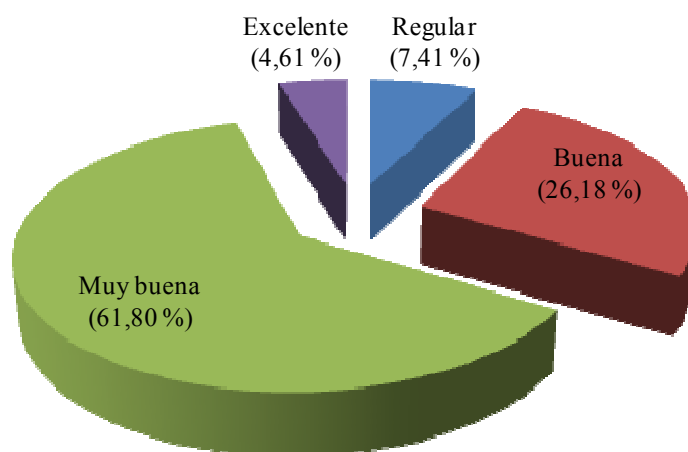


Fig. 8.12.- Distribución de la capacidad de acogida en la superficie disponible del litoral para albergar parques eólicos



La mejor alternativa para el problema de localización de emplazamientos óptimos de parques eólicos se sitúa en el norte del municipio de Murcia, corresponde con la referencia catastral 30030A01500005, parcela 5 y subparcela a, el valor del coeficiente R para dicha alternativa es $R=0,876258$. En cambio, el peor valor ($R=0,178441$) corresponde con una parcela situada en el oeste del municipio de Lorca cuya referencia catastral es 30024A25300012, parcela 12 y subparcela j.

8.3.4 Análisis y estudio de los resultados obtenidos mediante la metodología TOPSIS difusa y su visualización en gvSIG

Analizando la distribución de la capacidad de acogida para las tres tecnologías de EERR estudiadas (figuras 8.8., 8.10. y 8.12.), se observa que no hay notables diferencias entre dichas tecnologías en cuanto a porcentajes. Las alternativas con excelente capacidad de acogida presentan valoraciones muy similares (entre el 4 y 6.5 %), de modo similar ocurre para las alternativas con muy buena, buena y regular capacidad.

Realizando posteriormente un análisis por zonas es decir, observando las figuras 8.7., 8.9. y 8.11., se pueden extraer mayores conclusiones. Se aprecia que la comarca del Alto Guadalentín (comarca que engloba los municipios de Lorca, Puerto Lumbreras y Águilas), es la que proporciona un mayor número de alternativas con excelente capacidad de acogida para albergar instalaciones de EERR. Entre las causas de dicho resultado destaca el hecho de que dicha zona es una amplia extensión de territorio que contiene multitud de parcelas o alternativas de grandes dimensiones por lo que presentan un mayor atractivo para implantar instalaciones de esta índole.

Analizando dichas figuras con mayor grado de detalle se aprecia que en dicha comarca, y más concretamente en el municipio de Lorca, coexisten alternativas con excelente capacidad con otras que presentan una capacidad de acogida regular. La explicación a dicha falta de congruencia radica en el hecho de que el norte del municipio de Lorca es una de las zonas montañosas de la Región de Murcia por lo que, hay terrenos abruptos con grandes desniveles y elevadas pendientes que no resultan idóneos para albergar ningún tipo de instalación de EERR y otros que, aunque estén situados en zonas montañosas, sus propias características (grandes superficies, desniveles y pendientes



suaves, etc.) permiten que resulten muy atractivos para implantar cualquier tipo de las tecnologías renovables descritas.

También resulta destacable que aunque la comarca del campo de Cartagena y el Mar Menor son zonas relativamente extensas, no hay apenas alternativas con excelente capacidad de acogida ni tampoco un número elevado de alternativas aptas para albergar este tipo de instalaciones. Uno de los principales motivos por los que no hay apenas alternativas con excelente capacidad es el marcado carácter agrícola de dichas zonas, ya que provoca que no haya excesivas alternativas que presenten grandes extensiones de territorio (criterio que como se definió en capítulos anteriores influye en la decisión). La explicación a que no haya un número elevado de alternativas aptas se debe principalmente a la alta ocupación urbanística de la zona y a las protecciones específicas que le han asignado al suelo en diversas zonas (ZEPAs, LIC, etc.)

Continuando el análisis por zonas, se aprecia que aunque el municipio de Murcia es el segundo en extensión dispone de un número muy reducido de alternativas, la explicación radica en el hecho de que dispone de grandes superficies de terreno protegidas por la Red Natura 2000 (es decir definidas como LICs o ZEPAs) y que además, la mayor parte de suelo del municipio está catalogado como suelo urbano o suelo no urbano pero con protección especial por tanto, dispone de un territorio escaso para albergar infraestructuras de esta índole.

Los resultados aquí mostrados para los problemas de localización de emplazamientos óptimos de instalaciones de energía solar fotovoltaica, termoeléctrica y eólica se han obtenido utilizando la metodología TOPSIS difusa. Con el objetivo de disponer de otro punto de vista, se procederá a visualizar los resultados para este tipo de instalaciones realizando un proceso de eliminación de alternativas en función de los criterios definidos a través de sucesivos filtrados en gvSIG.



8.4 Evaluación, clasificación y comparación de las mejores alternativas mediante los métodos TOPSIS difuso y clásico y ELECTRE-TRI

Partiendo de las alternativas evaluadas con la metodología TOPSIS difusa, se escogerán las veinte mejor valoradas y se procederá a realizar una segunda evaluación, en este caso dicha evaluación se llevará a cabo mediante el empleo de dos métodos de decisión multicriterio explicados en capítulos anteriores: El método TOPSIS (clásico y difuso) y el método ELECTRE-TRI (para aplicar éste último método se empleará el software IRIS). Esta nueva evaluación permitirá por un lado comparar ambas metodologías de decisión multicriterio y por otro, comprobar la consistencia del método TOPSIS empleado en el problema de decisión de la presente Tesis Doctoral.

Los datos de partida para aplicar el método TOPSIS clásico serán los originales, es decir los mismos que se han empleado en el método TOPSIS difuso pero, llevando a cabo un proceso de defuzzificación para poder utilizarlos.

Como consecuencia del software de ayuda a la decisión que se empleará para aplicar la metodología ELECTRE-TRI (software IRIS), el número de alternativas a evaluar no puede ser muy elevado ya que IRIS no está capacitado para procesar un número elevado de alternativas y, es por ello por lo que se ha limitado su número a un total de 20 alternativas.

8.4.1 Evaluación mediante TOPSIS difuso y TOPSIS clásico

8.4.1.1 Evaluación de los 20 mejores emplazamientos de instalaciones solares fotovoltaicas

Una vez llevada a cabo el desarrollo de la metodología TOPSIS difusa para el problema de localización de emplazamientos óptimos para albergar huertos solares fotovoltaicos, los valores de la proximidad relativa a la solución ideal (positiva y negativa) permite obtener un ranking o coeficiente R con el que será posible evaluar la totalidad de alternativas (66.845). Con el objetivo de aplicar la metodología TOPSIS nuevamente se escogerán las veinte alternativas mejor valoradas con TOPSIS difuso y se aplicará tanto



el método TOPSIS difuso como TOPSIS clásico. En la figura 8.13. se localizan dichas alternativas en el litoral de la Región de Murcia, éstas se distribuyen concretamente en cinco municipios (Lorca, Águilas, Cartagena, Fuente Álamo y Murcia) y resulta de interés constatar que el municipio de Lorca es el que posee mayor número de emplazamientos óptimos de instalaciones solares fotovoltaicas (14 alternativas de las 20 seleccionadas), los municipios de Fuente Álamo y Cartagena poseen dos entre las veinte mejores y, en cambio el resto de municipios poseen una o ninguna alternativa entre las veinte mejor valoradas.

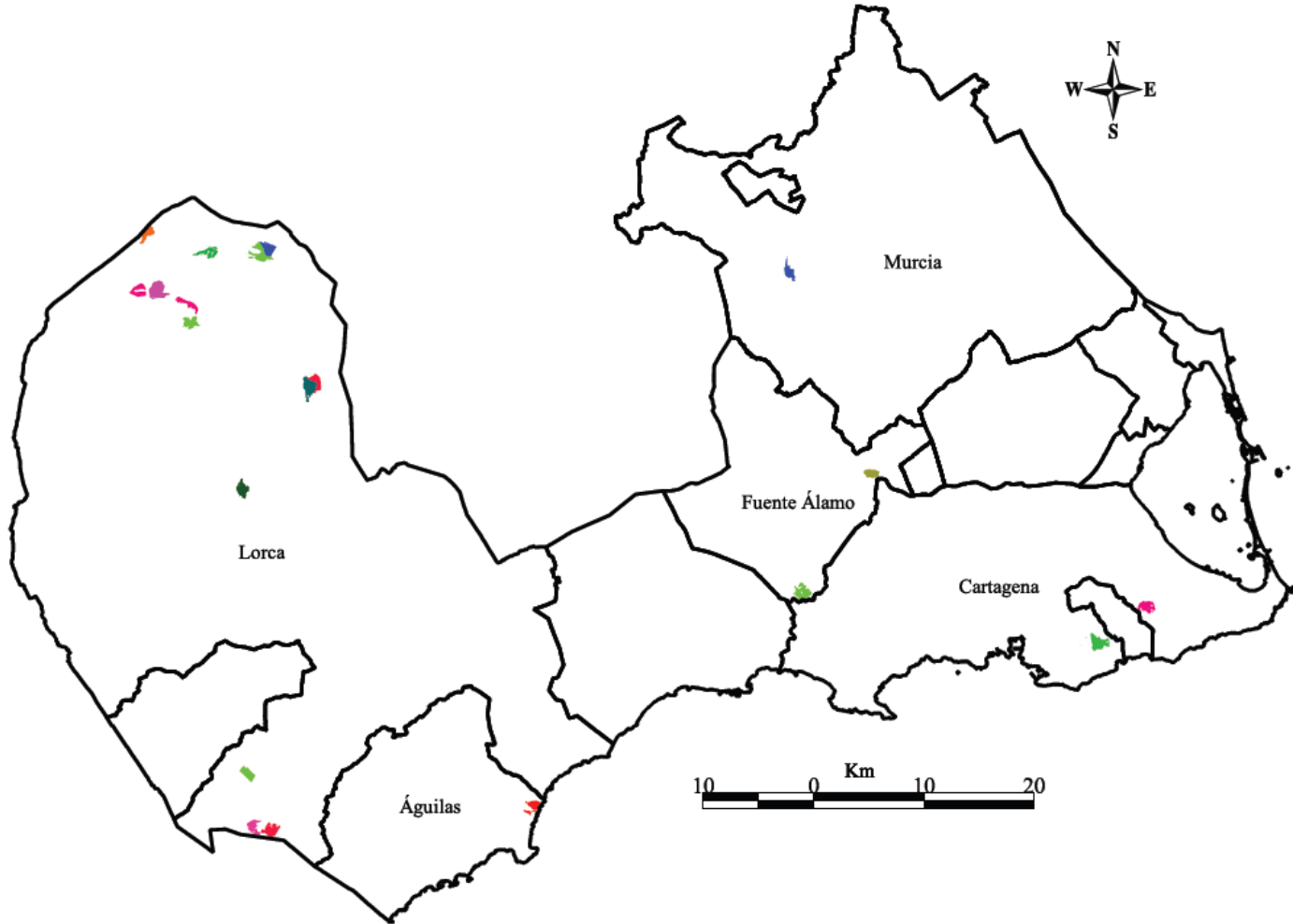


Fig. 8.13.- Veinte mejores emplazamientos para albergar instalaciones solares fotovoltaicas y termoeléctricas según el método TOPSIS difuso



Aplicando el método TOPSIS clásico y difuso sobre las veinte alternativas seleccionadas mediante el proceso descrito en el capítulo anterior se obtendrán unos nuevos valores de proximidad relativa (coeficiente R) en las 20 alternativas evaluadas, éstas, ordenadas de mayor a menor valoración según el método TOPSIS clásico se representan en la tabla 8.14.

En dicha tabla, concretamente en las columnas de los coeficientes R (según los métodos TOPSIS difuso y clásico), se representa entre paréntesis la posición que ocupan respecto al total de alternativas evaluadas

<i>Municipio</i>	<i>Parcela</i>	<i>Subparcela</i>	<i>Ref. Catastral</i>	<i>R. TOPSIS Clásico</i>	<i>R. TOPSIS Difuso</i>
Lorca	13	e	30024A13400013	0,7236 (1°)	0,7396 (1°)
Lorca	37	v	30024A00900037	0,7046 (2°)	0,7128 (2°)
Lorca	37	z	30024A00900037	0,6428 (3°)	0,6581 (3°)
Lorca	72	d	30024A00200072	0,6275 (4°)	0,6345 (5°)
Águilas	6	r	30003A01500006	0,6238 (5°)	0,6406 (4°)
Lorca	13	v	30024A03300013	0,5996 (6°)	0,6113 (6°)
Lorca	53	a	30024A00600053	0,5915 (7°)	0,6094 (7°)
Cartagena	6	aa	51016A04600006	0,5662 (8°)	0,5791 (8°)
Fuente Álamo	13	a	51021A03800013	0,5613 (9°)	0,5772 (10°)
Lorca	16	c	30024A12800016	0,5606 (10°)	0,5781 (9°)
Cartagena	7	a	51016A04700007	0,5607 (11°)	0,5744 (12°)
Lorca	59	a	30024A12800059	0,5556 (12°)	0,5731 (13°)
Fuente Álamo	404	b	51021A03400404	0,5555 (13°)	0,5763 (11°)
Lorca	25	a	30024A01500025	0,5539 (14°)	0,5673 (14°)
Lorca	13	w	30024A03300013	0,5489 (15°)	0,5608 (15°)
Murcia	11	a	30030A16800011	0,5449 (16°)	0,5510 (16°)
Lorca	40	a	30024A01600040	0,5254 (17°)	0,5375 (17°)
Lorca	8	f	30024A01400008	0,5202 (18°)	0,5347 (18°)
Lorca	2	a	30024A28900002	0,4405 (19°)	0,4597 (19°)
Lorca	34	h	30024A31200034	0,3490 (20°)	0,3683 (20°)

Tabla 8.14.- Evaluación de 20 mejores alternativas con TOPSIS Clásico y Difuso (localización de instalaciones solares fotovoltaicas)



Observando la tabla anterior se aprecia que las diferencias entre ambos métodos de decisión son mínimas y por tanto resulta prácticamente inapreciable emplear uno u otro. Analizando la información mostrada también se observa que de las diez alternativas mejor valoradas, siete están situadas en el municipio de Lorca resultando la mejor alternativa la correspondiente a la referencia catastral 30024A13400013, parcela 13 y subparcela e.

Respecto al total de las veinte alternativas analizadas, catorce alternativas están situadas en el municipio de Lorca por lo que es el municipio que proporciona un mayor número de alternativas para albergar instalaciones solares fotovoltaicas.

Entre las causas de dichos resultados destaca el hecho de que el municipio de Lorca contiene una amplia extensión de territorio con multitud de parcelas o alternativas de grandes dimensiones por lo que presentan un elevado atractivo para implantar instalaciones de esta índole.

8.4.1.2 Evaluación de los 20 mejores emplazamientos de instalaciones solares termoeléctricas

En el problema de localización de emplazamientos óptimos para albergar instalaciones solares termoeléctricas se procederá de forma análoga al apartado anterior.

Se tomará como punto de partida las veinte mejores alternativas obtenidas con TOPSIS difuso, éstas son coincidentes con las obtenidas para el problema de localización de huertos solares fotovoltaicos, por tanto su distribución coincide con la mostrada en la figura 8.13.

El método TOPSIS clásico y TOPSIS difuso proporcionan unos nuevos valores de proximidad relativa (o coeficiente R) en las 20 alternativas evaluadas, las principales características de éstas y los valores de sus coeficientes R (ordenados de mayor a menor valoración), serán las siguientes:



<i>Municipio</i>	<i>Parcela</i>	<i>Subparcela</i>	<i>Ref. Catastral</i>	<i>R. TOPSIS Clásico</i>	<i>R. TOPSIS Difuso</i>
Lorca	00013	e	30024A13400013	0,8254 (1°)	0,8659 (1°)
Fuente Álamo	00404	b	51021A03400404	0,7932 (2°)	0,8366 (2°)
Águilas	00006	r	30003A01500006	0,7923 (3°)	0,8323 (3°)
Cartagena	00007	a	51016A04700007	0,7845 (4°)	0,8189 (4°)
Cartagena	00006	aa	51016A04600006	0,7809 (5°)	0,8141 (6°)
Lorca	00059	a	30024A12800059	0,7763 (6°)	0,8183 (5°)
Fuente Álamo	00013	a	51021A03800013	0,7740 (7°)	0,8086 (7°)
Lorca	00016	c	30024A12800016	0,7649 (8°)	0,8066 (8°)
Lorca	00013	v	30024A03300013	0,7563 (9°)	0,7773 (9°)
Lorca	00013	w	30024A03300013	0,7464 (10°)	0,7690 (10°)
Lorca	00025	a	30024A01500025	0,7152 (11°)	0,7339 (13°)
Lorca	00053	a	30024A00600053	0,7135 (12°)	0,7500 (11°)
Lorca	00040	a	30024A01600040	0,7135 (13°)	0,7398 (12°)
Lorca	00008	f	30024A01400008	0,7070 (14°)	0,7325 (14°)
Murcia	00011	a	30030A16800011	0,6850 (15°)	0,7258 (15°)
Lorca	00002	a	30024A28900002	0,6782 (16°)	0,7062 (16°)
Lorca	00072	d	30024A00200072	0,6315 (17°)	0,6626 (17°)
Lorca	00034	h	30024A31200034	0,6215 (18°)	0,6494 (18°)
Lorca	00037	z	30024A00900037	0,4144 (19°)	0,4583 (19°)
Lorca	00037	v	30024A00900037	0,3911 (20°)	0,4313 (20°)

Tabla 8.15.- Evaluación de 20 mejores alternativas con TOPSIS Clásico y Difuso (localización de instalaciones solares termoeléctricas)

De forma similar a lo ocurrido para el caso de huertos solares fotovoltaicos y, según los resultados mostrados en los coeficientes R para ambos métodos, las diferencias entre ambos son apenas apreciables y resulta por tanto indiferente emplear uno u otro.

Comparando las tablas 8.14. y 8.15. se observa que aunque las alternativas sean coincidentes, los valores de las proximidades relativas o coeficientes R son diferentes para huertos solares fotovoltaicos que para instalaciones solares termoeléctricas, entre los diferentes motivos que implican esta diferencia habría que destacar que los criterios no presentan la misma importancia en ambas tecnologías por lo que, es de esperar valores de proximidad relativa diferentes. Sin embargo, es de apreciar que aunque los criterios tengan distinto peso o coeficiente de importancia, la mejor alternativa es



coincidente es decir, la alternativa con referencia catastral 30024A13400013, parcela 13 y subparcela e, es la mejor valorada en ambos casos.

En este caso en concreto, no se observa una diferencia tan clara del municipio de Lorca respecto al resto de municipios ya que, si para el caso de huertos solares fotovoltaicos había cuatro de las cinco mejores alternativas pertenecientes a dicho municipio, ahora ocurre justamente al contrario es decir, la primera alternativa respecto a las cinco mejores es la única situada en dicho municipio. La causa del mencionado contraste puede encontrarse de nuevo en los pesos o coeficientes de importancia de los criterios que influyen en la decisión ya que, éstos son diferentes en ambas tecnologías.

8.4.1.3 Evaluación de los 20 mejores emplazamientos de parques eólicos

Los valores de la proximidad relativa o a la solución ideal, obtenidos en el método TOPSIS difuso para el problema de localización de emplazamientos óptimos de parques eólicos, permitirán obtener un ranking definido mediante coeficientes (R) que evaluará la totalidad de alternativas (33.290). Con el objetivo de aplicar la metodología TOPSIS clásica y difusa se escogerán las 20 alternativas mejor valoradas con TOPSIS difuso.

En la figura 8.14. se localizan las mencionadas alternativas en el litoral de la Región de Murcia, éstas se distribuyen concretamente en seis municipios (Lorca, Águilas, Cartagena, Fuente Álamo, Mazarrón y Murcia) y de nuevo resulta de interés constatar que el municipio de Lorca es el que posee mayor número de emplazamientos óptimos para albergar parques eólicos (12 alternativas de las 20 seleccionadas), también es interesante observar que así como para instalaciones solares fotovoltaicas y termoeléctricas el municipio de Murcia únicamente presentaba una alternativa entre las veinte mejores, para el problema de localización de parques eólicos hay tres alternativas situadas en dicho municipio. El municipio de Cartagena posee dos alternativas entre las veinte mejores y, el resto de municipios tienen una o ninguna alternativa entre las veinte mejor valoradas mediante el método TOPSIS difuso.

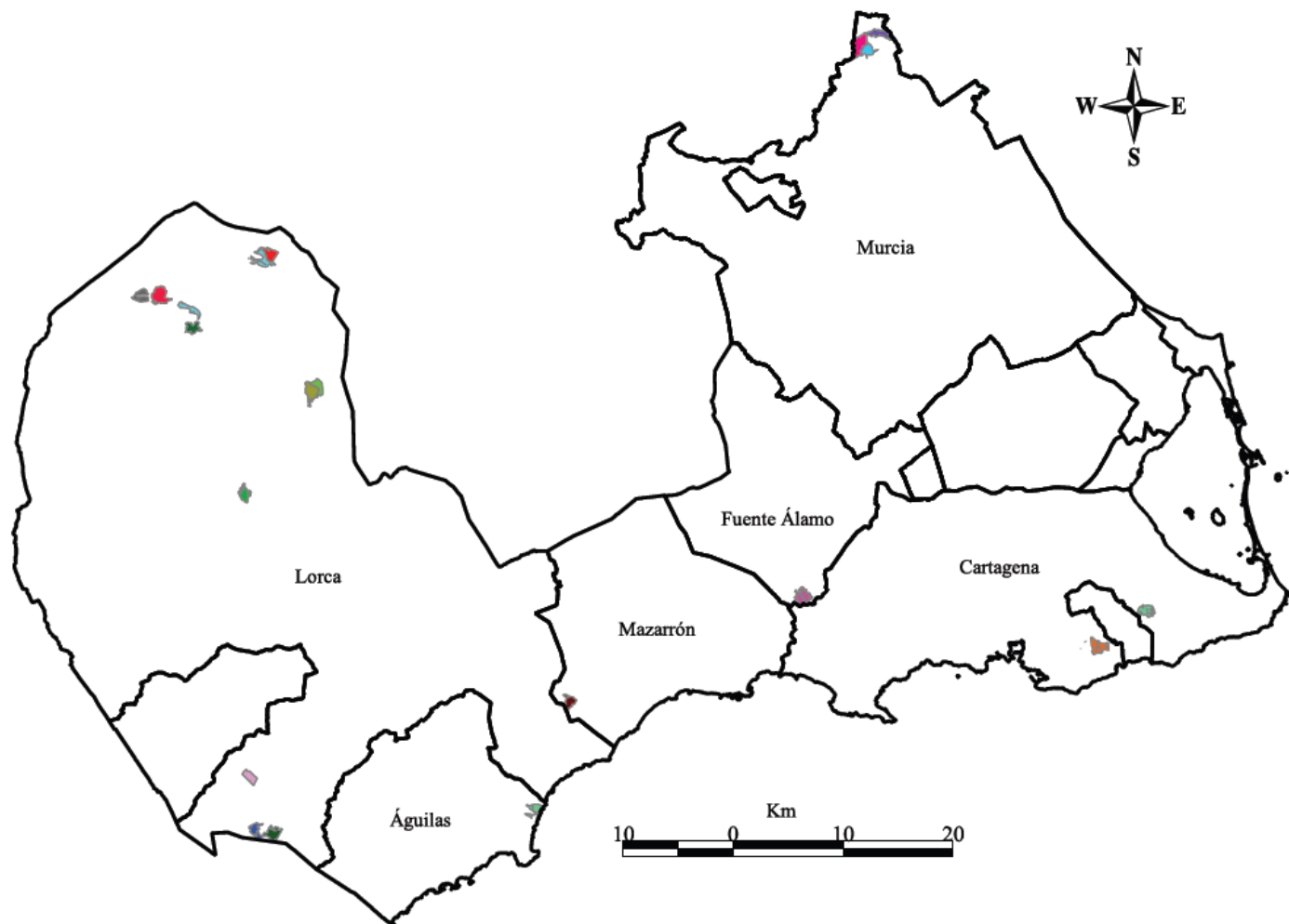


Fig. 8.14.- Veinte mejores emplazamientos para albergar parques eólicos según el método TOPSIS difuso



Los métodos TOPSIS clásico y difuso proporcionan unos nuevos valores de proximidad relativa o coeficiente R para las 20 alternativas seleccionadas, ordenadas de mayor a menor valor de coeficiente R y expresando entre paréntesis su ranking se representan en la siguiente tabla:

<i>Municipio</i>	<i>Parcela</i>	<i>Subparcela</i>	<i>Ref. Catastral</i>	<i>R. TOPSIS Clásico</i>	<i>R. TOPSIS Difuso</i>
Lorca	00013	e	30024A13400013	0,6174 (1°)	0.6827 (1°)
Águilas	00006	r	30003A01500006	0,5605 (2°)	0.6240 (2°)
Mazarrón	00264	d	30026A02300264	0,5566 (3°)	0.6071 (4°)
Murcia	00091	a	30030A01600091	0,5535 (4°)	0.6089 (3°)
Cartagena	00006	aa	51016A04600006	0,5379 (5°)	0.5965 (5°)
Fuente Álamo	00404	b	51021A03400404	0,5172 (6°)	0.5755 (6°)
Lorca	00016	c	30024A12800016	0,5072 (7°)	0.5477 (8°)
Cartagena	00007	a	51016A04700007	0,5053 (8°)	0.5600 (7°)
Lorca	00059	a	30024A12800059	0,5026 (9°)	0.5430 (10°)
Lorca	00013	v	30024A03300013	0,4964 (10°)	0.5450 (9°)
Lorca	00034	h	30024A31200034	0,4800 (11°)	0.5262 (11°)
Lorca	00037	v	30024A00900037	0,4717 (12°)	0.5260 (13°)
Lorca	00037	z	30024A00900037	0,4616 (13°)	0.5261 (12°)
Lorca	00013	w	30024A03300013	0,4485 (14°)	0.4929 (14°)
Lorca	00008	f	30024A01400008	0,4452 (15°)	0.4882 (15°)
Lorca	00025	a	30024A01500025	0,4295 (16°)	0.4616 (16°)
Lorca	00040	a	30024A01600040	0,4189 (17°)	0.4456 (18°)
Lorca	00002	a	30024A28900002	0,4181 (18°)	0.4587 (17°)
Murcia	00005	a	30030A01500005	0,4036 (19°)	0.4351 (19°)
Murcia	00006	l	30030A01700006	0,4034 (20°)	0.4305 (20°)

Tabla 8.16.- Evaluación de 20 mejores alternativas con TOPSIS Clásico y Difuso (localización de parques eólicos)

Nuevamente se aprecia que la diferencia entre ambos métodos de decisión es tan escasa que como máximo hay una posición de diferencia entre las alternativas analizadas.

Comparando las tablas 8.14., 8.15. y 8.16. se observa que la mayoría de las alternativas son coincidentes, no obstante es de esperar que los valores de las proximidades relativas o ranking sean diferentes entre los problemas de localización de instalaciones solares y



parques eólicos ya que, los criterios no presentan la misma importancia entre dichas tecnologías.

Sin embargo, es de destacar que aunque los criterios tengan distinto peso o coeficiente de importancia, la mejor alternativa en los tres casos es coincidente es decir, la alternativa con referencia catastral 30024A13400013, parcela 13 y subparcela e, es la mejor valorada en la totalidad de los casos a estudio según la metodología TOPSIS.

8.4.2 Clasificación mediante ELECTRE-TRI

8.4.2.1 Clasificación de los 20 mejores emplazamientos de instalaciones solares fotovoltaicas

El procedimiento que se llevará a cabo será similar al realizado en el apartado anterior con la salvedad de que, en este caso, para clasificar las veinte mejores alternativas obtenidas con TOPSIS difuso para albergar huertos solares fotovoltaicos (figura 8.13.), se utilizará otra metodología de decisión multicriterio denominada ELECTRE-TRI que permitirá comprobar la consistencia de la metodología utilizada hasta el momento (TOPSIS).

Para su desarrollo se recurrirá al empleo de un software de decisión denominado IRIS; el uso de este software es el que origina que se estimen únicamente las veinte mejores alternativas ya que, no permite procesar un número muy elevado de alternativas.

Siguiendo los pasos descritos en el capítulo anterior para aplicar IRIS se establecerá como punto de partida la clasificación por categorías proporcionada por los expertos, ésta permitirá clasificar cada una de las alternativas en una categoría dada según presente mejor o peor disposición para albergar una instalación de EERR:

- Categoría 1 (C1): Regular capacidad
- Categoría 2 (C2): Buena capacidad
- Categoría 3 (C3): Muy buena capacidad
- Categoría 4 (C4): Excelente capacidad



Mediante consulta con expertos en la tabla 8.1. se definen los límites de cada una de dichas categorías en función de cada criterio para cada una de las EERR objeto de la presente Tesis. Aplicando el software IRIS de la forma descrita en el capítulo anterior, para el problema de localización de emplazamientos óptimos de instalaciones solares fotovoltaicas la clasificación es la siguiente:

	C1	C2	C3	C4
30024A01400008f		■		
30024A03300013w			■	
51016A04700007a			■	
51021A03400404b			■	
30024A00900037z		■		
51016A04600006a.			■	■
30024A12800059a			■	
30024A00900037v		■		
30024A31200034h			■	
30024A01600040a		■		
30024A28900002a		■		
30024A12800016c			■	■
30024A13400013e				■
30024A03300013v			■	■
30003A01500006f				■
30024A01500025a		■		
30024A00200072d	■			
30030A16800011a			■	
30024A00600053a		■		
51021A03800013a			■	■

Fig. 8.15.- Clasificación de alternativas aplicando ELECTRE-TRI mediante IRIS (localización de instalaciones solares fotovoltaicas)

Las alternativas en la figura anterior se han definido en función de la referencia catastral y de las subparcelas, ya que de esta manera será posible relacionarlas con los valores proporcionados por el método TOPSIS.

Indicando por tanto dicha clasificación de forma tabulada y descomponiendo la información que proporciona la referencia catastral (municipio, polígono y parcelas) se obtendrá la siguiente tabla:



<i>Municipio</i>	<i>Polígono</i>	<i>Parcela</i>	<i>Subparcela</i>	<i>Ref. Catastral</i>	<i>Categoría</i>
Lorca	134	13	e	30024A13400013	C4
Lorca	009	37	v	30024A00900037	C2
Lorca	009	37	z	30024A00900037	C2
Lorca	002	72	d	30024A00200072	C1
Águilas	015	6	r	30003A01500006	C4
Lorca	033	13	v	30024A03300013	C4
Lorca	006	53	a	30024A00600053	C2
Cartagena	046	6	aa	51016A04600006	C4
Fuente Álamo	038	13	a	51021A03800013	C4
Lorca	128	16	c	30024A12800016	C4
Cartagena	047	7	a	51016A04700007	C3
Lorca	128	59	a	30024A12800059	C3
Fuente Álamo	034	404	b	51021A03400404	C3
Lorca	015	25	a	30024A01500025	C2
Lorca	033	13	w	30024A03300013	C3
Murcia	168	11	a	30030A16800011	C3
Lorca	016	40	a	30024A01600040	C2
Lorca	014	8	f	30024A01400008	C2
Lorca	289	2	a	30024A28900002	C2
Lorca	312	34	h	30024A31200034	C3

Tabla 8.17.- Clasificación de 20 mejores alternativas con ELECTRE-TRI mediante IRIS (localización de instalaciones solares fotovoltaicas)

Los resultados mostrados en la tabla anterior indican que hay seis alternativas situadas en la categoría C4 (excelente capacidad), tales alternativas se distribuyen en cuatro municipios (Lorca, Águilas, Cartagena y Fuente Álamo). En la categoría C3 (muy buena capacidad) hay también seis alternativas que están nuevamente distribuidas en cuatro municipios (Cartagena, Lorca, Fuente Álamo y Murcia). Es de destacar que según el método ELECTRE-TRI únicamente hay una alternativa en la categoría C1 (regular capacidad).



8.4.2.2 Clasificación de los 20 mejores emplazamientos de instalaciones solares termoeléctricas

De manera análoga al desarrollo seguido en el apartado anterior se procederá a clasificar los 20 mejores emplazamientos para albergar instalaciones solares termoeléctricas. Para ello se utilizará nuevamente el método ELECTRE-TRI mediante el uso del software IRIS.

La clasificación por categorías en función de su capacidad (C1: regular, C2: buena, C3: muy buena, C4: excelente) obtenida mediante el software IRIS para el problema de localización de emplazamientos de instalaciones solares termoeléctricas es la siguiente:

	C1	C2	C3	C4
30024A01400008f				
51016A04700007a				
51021A03400404b				
30024A03300013w				
30024A12800059a				
51016A04600006a				
30024A00900037z				
30024A31200034h				
30024A01600040a				
30024A28900002a				
30024A12800016c				
30024A13400013e				
30024A00900037v				
30024A03300013v				
30003A01500006r				
30024A01500025a				
30024A00600053a				
30030A16800011a				
51021A03800013a				
30024A00200072d				

Fig. 8.16.- Clasificación de alternativas aplicando ELECTRE-TRI mediante IRIS (localización de instalaciones solares termoeléctricas)

Descomponiendo la información que proporciona la referencia catastral se obtendrá la tabla 8.18 en la que se representan nuevamente cada alternativa en función del municipio al que corresponde, el número de polígono y de parcela así como de la identificación de la subparcela.



<i>Municipio</i>	<i>Polígono</i>	<i>Parcela</i>	<i>Subparcela</i>	<i>Ref. Catastral</i>	<i>Categoría</i>
Lorca	134	00013	e	30024A13400013	C3
Fuente Álamo	034	00404	b	51021A03400404	C2
Águilas	015	00006	r	30003A01500006	C3
Cartagena	047	00007	a	51016A04700007	C2
Cartagena	046	00006	aa	51016A04600006	C2
Lorca	128	00059	a	30024A12800059	C2
Fuente Álamo	038	00013	a	51021A03800013	C2
Lorca	128	00016	c	30024A12800016	C2
Lorca	033	00013	v	30024A03300013	C3
Lorca	033	00013	w	30024A03300013	C2
Lorca	015	00025	a	30024A01500025	C2
Lorca	006	00053	a	30024A00600053	C2
Lorca	016	00040	a	30024A01600040	C2
Lorca	014	00008	f	30024A01400008	C2
Murcia	168	00011	a	30030A16800011	C2
Lorca	289	00002	a	30024A28900002	C2
Lorca	002	00072	d	30024A00200072	C1
Lorca	312	00034	h	30024A31200034	C2
Lorca	009	00037	z	30024A00900037	C2
Lorca	009	00037	v	30024A00900037	C2

Tabla 8.18.- Clasificación de 20 mejores alternativas con ELECTRE-TRI mediante IRIS (localización de instalaciones solares termoeléctricas)

Los resultados mostrados indican que no hay ninguna alternativa situada en la mejor categoría (C4), en cambio hay tres alternativas situadas en la categoría C3, dichas alternativas se distribuyen en dos municipios (Lorca y Águilas). La mayor parte de las alternativas están situadas en la categoría C2 distribuidas en cuatro municipios (Cartagena, Lorca, Fuente Álamo y Murcia).

8.4.2.3 Clasificación de los 20 mejores emplazamientos de parques eólicos

Siguiendo el mismo procedimiento desarrollado en los apartados anteriores, la clasificación por categorías de emplazamientos de parques eólicos es de la forma indicada en la fig. 8.17. y sus principales características se resumen en la tabla 8.19.



	C1	C2	C3	C4
30030A01500005a				
30024A01400008f				
30024A03300013w				
51016A04700007a				
51021A03400404b				
30024A00900037z				
51016A04600006a				
30024A12800059a				
30024A00900037v				
30030A01600091a				
30024A31200034h				
30024A12800016c				
30024A28900002a				
30024A01600040a				
30024A13400013e				
30003A01500006r				
30030A01700006l				
30024A03300013v				
30026A02300264d				
30024A01500025a				

Fig. 8.17.- Clasificación de alternativas aplicando ELECTRE-TRI mediante IRIS (localización de parques eólicos)

Municipio	Polígono	Parcela	Subparcela	Ref. Catastral	Categoría
Lorca	134	00013	e	30024A13400013	C2
Águilas	015	00006	r	30003A01500006	C4
Mazarrón	023	00264	d	30026A02300264	C4
Murcia	016	00091	a	30030A01600091	C3
Cartagena	046	00006	aa	51016A04600006	C3
Fuente Álamo	034	00404	b	51021A03400404	C3
Lorca	128	00016	c	30024A12800016	C1
Cartagena	047	00007	a	51016A04700007	C3
Lorca	128	00059	a	30024A12800059	C1
Lorca	033	00013	v	30024A03300013	C1
Lorca	312	00034	h	30024A31200034	C4
Lorca	009	00037	v	30024A00900037	C1
Lorca	009	00037	z	30024A00900037	C1
Lorca	033	00013	w	30024A03300013	C1
Lorca	014	00008	f	30024A01400008	C1
Lorca	015	00025	a	30024A01500025	C1
Lorca	016	00040	a	30024A01600040	C1
Lorca	289	00002	a	30024A28900002	C1
Murcia	015	00005	a	30030A01500005	C4
Murcia	017	00006	l	30030A01700006	C3

Tabla 8.19.- Clasificación de 20 mejores alternativas con ELECTRE-TRI mediante IRIS (localización de parques eólicos)



Los resultados de la tabla anterior indican que hay tres alternativas situadas en la mejor categoría (C4), corresponden con tres municipios distintos (Lorca Águilas y Mazarrón), también hay tres alternativas situadas en la categoría C3, dichas alternativas se distribuyen en dos municipios (Cartagena y Fuente Álamo). En este caso se destaca el hecho de que únicamente hay una alternativa situada en la categoría C2 mientras que la mayor parte de las alternativas están situadas en la categoría C1.

8.4.3 Comparación entre métodos de decisión multicriterio: TOPSIS clásico, TOPSIS difuso y ELECTRE-TRI

8.4.3.1 Comparación con los 20 mejores emplazamientos de instalaciones solares fotovoltaicas

A continuación se procederá a comparar los resultados obtenidos con las diferentes metodologías de decisión multicriterio.

En la tabla 8.20 se observan las alternativas seleccionadas para el problema de localización de emplazamientos óptimos de huertos solares fotovoltaicos que, han sido objeto de evaluación mediante los métodos TOPSIS clásico y TOPSIS difuso así como, de clasificación por categorías a través del método ELECTRE-TRI.

En las columnas que muestran la valoración de los métodos TOPSIS, se representan entre paréntesis la posición que ocupan según cada uno de los métodos utilizados.

Dado que el método ELECTRE-TRI permite obtener una clasificación por alternativas sin llegar a proporcionar una valoración de las mismas, como medida de comparación con los métodos TOPSIS se ha llevado a cabo la resolución de la metodología ELECTRE-TRI mediante una hoja de cálculo con el objetivo de conocer el valor del grado de credibilidad (σ_s) de cada alternativa en función de la categoría a la que pertenezca (valores expresados entre paréntesis) es decir, mediante dicho grado de credibilidad se conocerá en qué grado cada alternativa superará al límite de la categoría a la que pertenezca.



<i>Municipio</i>	<i>Ref. Catastral</i>	<i>Subparcela</i>	<i>R. TOPSIS Clásico</i>	<i>R. TOPSIS Difuso</i>	<i>Clasificación ELECTRE-TRI</i>
Lorca	30024A13400013	e	0,7236 (1º)	0,7396 (1º)	C4 (0,80)
Lorca	30024A00900037	v	0,7046 (2º)	0,7128 (2º)	C2 (0,83)
Lorca	30024A00900037	z	0,6428 (3º)	0,6581 (3º)	C2 (0,83)
Lorca	30024A00200072	d	0,6275 (4º)	0,6345 (5º)	C1 (0,43)
Águilas	30003A01500006	r	0,6238 (5º)	0,6406 (4º)	C4 (0,90)
Lorca	30024A03300013	v	0,5996 (6º)	0,6113 (6º)	C4 (0,77)
Lorca	30024A00600053	a	0,5915 (7º)	0,6094 (7º)	C2 (0,83)
Cartagena	51016A04600006	aa	0,5662 (8º)	0,5791 (8º)	C4 (0,58)
Fuente Álamo	51021A03800013	a	0,5613 (9º)	0,5772 (10º)	C4 (0,59)
Lorca	30024A12800016	c	0,5606 (10º)	0,5781 (9º)	C4 (0,42)
Cartagena	51016A04700007	a	0,5607 (11º)	0,5744 (12º)	C3 (0,81)
Lorca	30024A12800059	a	0,5556 (12º)	0,5731 (13º)	C3 (0,65)
Fuente Álamo	51021A03400404	b	0,5555 (13º)	0,5763 (11º)	C3 (0,81)
Lorca	30024A01500025	a	0,5539 (14º)	0,5673 (14º)	C2 (0,83)
Lorca	30024A03300013	w	0,5489 (15º)	0,5608 (15º)	C3 (0,65)
Murcia	30030A16800011	a	0,5449 (16º)	0,5510 (16º)	C3 (0,65)
Lorca	30024A01600040	a	0,5254 (17º)	0,5375 (17º)	C2 (0,83)
Lorca	30024A01400008	f	0,5202 (18º)	0,5347 (18º)	C2 (0,81)
Lorca	30024A28900002	a	0,4405 (19º)	0,4597 (19º)	C2 (0,83)
Lorca	30024A31200034	h	0,3490 (20º)	0,3683 (20º)	C3 (0,15)

*Tabla 8.20.- Comparativa entre los métodos TOPSIS y ELECTRE-TRI
(localización de instalaciones solares fotovoltaicas)*

Comparando los resultados obtenidos en la tabla 8.20. se observa que aunque no son coincidentes los valores obtenidos mediante TOPSIS con la clasificación proporcionada por ELECTRE-TRI, de las diez alternativas con mejor valoración, seis están situadas en la mejor categoría (C4). La alternativa situada en la mejor categoría (C4) según ELECTRE-TRI y que presenta un mayor grado de credibilidad (0,90) ocupa la posición 4ª y 5ª según los métodos TOPSIS difuso y clásico. No obstante la alternativa mejor valorada según los métodos TOPSIS, está situada en la categoría C4 y presenta el segundo mayor grado de credibilidad (0,80) según ELECTRE-TRI es decir, sería la segunda mejor valorada. Dicha alternativa está situada en el municipio de Lorca y le corresponde una referencia catastral 30024A13400013, parcela 13 y subparcela e.



8.4.3.2 Comparación con los 20 mejores emplazamientos de instalaciones solares termoeléctricas

Se procederá de nuevo a mostrar los resultados obtenidos con los métodos TOPSIS con los proporcionados por el método ELECTRE-TRI pero en este caso, para el problema de localización de emplazamientos óptimos de instalaciones solares termoeléctricas. En la siguiente tabla (tabla 8.21.) se muestran los resultados que han sido objeto de evaluación con el método TOPSIS y clasificación por categorías con el método ELECTRE-TRI (reflejando también los grados de credibilidad en función de la categoría a la que pertenecen):

<i>Municipio</i>	<i>Ref. Catastral</i>	<i>Subparcela</i>	<i>R. TOPSIS Clásico</i>	<i>R. TOPSIS Difuso</i>	<i>Clasificación ELECTRE-TRI</i>
Lorca	30024A13400013	e	0,8254 (1°)	0,8659 (1°)	C3 (0,85)
Fuente Álamo	51021A03400404	b	0,7932 (2°)	0,8366 (2°)	C2 (0,95)
Águilas	30003A01500006	r	0,7923 (3°)	0,8323 (3°)	C3 (0,95)
Cartagena	51016A04700007	a	0,7845 (4°)	0,8189 (4°)	C2 (0,95)
Cartagena	51016A04600006	aa	0,7809 (5°)	0,8141 (6°)	C2 (0,95)
Lorca	30024A12800059	a	0,7763 (6°)	0,8183 (5°)	C2 (0,95)
Fuente Álamo	51021A03800013	a	0,7740 (7°)	0,8086 (7°)	C2 (0,95)
Lorca	30024A12800016	c	0,7649 (8°)	0,8066 (8°)	C2 (0,95)
Lorca	30024A03300013	v	0,7563 (9°)	0,7773 (9°)	C3 (0,80)
Lorca	30024A03300013	w	0,7464 (10°)	0,7690 (10°)	C2 (0,95)
Lorca	30024A01500025	a	0,7152 (11°)	0,7339 (13°)	C2 (0,80)
Lorca	30024A00600053	a	0,7135 (12°)	0,7500 (11°)	C2 (0,85)
Lorca	30024A01600040	a	0,7135 (13°)	0,7398 (12°)	C2 (0,80)
Lorca	30024A01400008	f	0,7070 (14°)	0,7325 (14°)	C2 (0,80)
Murcia	30030A16800011	a	0,6850 (15°)	0,7258 (15°)	C2 (0,86)
Lorca	30024A28900002	a	0,6782 (16°)	0,7062 (16°)	C2 (0,80)
Lorca	30024A00200072	d	0,6315 (17°)	0,6626 (17°)	C1 (0,29)
Lorca	30024A31200034	h	0,6215 (18°)	0,6494 (18°)	C2 (0,95)
Lorca	30024A00900037	z	0,4144 (19°)	0,4583 (19°)	C2 (0,85)
Lorca	30024A00900037	v	0,3911 (20°)	0,4313 (20°)	C2 (0,85)

Tabla 8.21.- Comparativa entre los métodos TOPSIS y ELECTRE-TRI
(localización de instalaciones solares termoeléctricas)



Analizando la tabla anterior se observa que nuevamente los valores no llegan a coincidir exactamente con las mejores categorías, de las diez alternativas con mejor valoración, tres están situadas en la categoría más elevada en este caso (C3).

De modo análogo al caso de instalaciones solares fotovoltaicas, la alternativa mejor valorada según los métodos TOPSIS (referencia catastral 30024A13400013, parcela 13 y subparcela e), es la que presenta el segundo mayor grado de credibilidad (0,85) para su categoría (C3).

La alternativa mejor clasificada y con mayor grado de credibilidad (0,95) según ELECTRE-TRI corresponde con la tercera mejor alternativa según los métodos TOPSIS, ésta se sitúa en el municipio de Águilas y se define mediante la referencia catastral 30003A01500006, parcela 6 y subparcela r.

8.4.3.3 Comparación con los 20 mejores emplazamientos de parques eólicos

Procedimiento de forma idéntica a lo indicado en los apartados anteriores, se reflejarán en la tabla 8.22. los resultados obtenidos con los métodos TOPSIS con los proporcionados por el método ELECTRE-TRI para el problema de localización de emplazamientos óptimos de parques eólicos:

Analizando dicha tabla se observa que en este caso, los valores son bastante dispares no llegando a establecerse concordancia entre los métodos TOPSIS y ELECTRE-TRI ya que, según la clasificación proporcionada por ELECTRE-TRI hay una alternativa situada en la categoría C4 cuya valoración según el método TOPSIS es muy baja (referencia catastral 30030A01500005 y subparcela a).

No obstante de las diez alternativas con mejor valoración, dos están situadas en la mejor categoría (C4) y tres en la segunda mejor categoría (C3); además la primera y segunda alternativa mejor clasificadas y con mayor grado de credibilidad según ELECTRE-TRI corresponden según los métodos TOPSIS con la segunda y tercera alternativas mejor valoradas.



Sin embargo, en este caso no existe concordancia entre la alternativa mejor valorada y la situada en la categoría más elevada puesto que la alternativa mejor valorada según los métodos TOPSIS (referencia catastral 30024A13400013 y subparcela e) le corresponde la categoría C2 según el método ELECTRE-TRI y, la alternativa que ocupa la posición 19 según los métodos TOPSIS (referencia catastral 30030A01500005, parcela 5 y subparcela a) sería la cuarta mejor clasificada según ELECTRE-TRI

<i>Municipio</i>	<i>Ref. Catastral</i>	<i>Subparcela</i>	<i>R. TOPSIS Clásico</i>	<i>R. TOPSIS Difuso</i>	<i>Clasificación ELECTRE-TRI</i>
Lorca	30024A13400013	e	0,6174 (1°)	0.6827 (1°)	C2 (0,95)
Águilas	30003A01500006	r	0,5605 (2°)	0.6240 (2°)	C4 (0,73)
Mazarrón	30026A02300264	d	0,5566 (3°)	0.6071 (4°)	C4 (0,72)
Murcia	30030A01600091	a	0,5535 (4°)	0.6089 (3°)	C3 (0,92)
Cartagena	51016A04600006	aa	0,5379 (5°)	0.5965 (5°)	C3 (0,86)
Fuente Álamo	51021A03400404	b	0,5172 (6°)	0.5755 (6°)	C3 (0,81)
Lorca	30024A12800016	c	0,5072 (7°)	0.5477 (8°)	C1 (0,00)
Cartagena	51016A04700007	a	0,5053 (8°)	0.5600 (7°)	C3 (0,88)
Lorca	30024A12800059	a	0,5026 (9°)	0.5430 (10°)	C1 (0,00)
Lorca	30024A03300013	v	0,4964 (10°)	0.5450 (9°)	C1 (0,00)
Lorca	30024A31200034	h	0,4800 (11°)	0.5262 (11°)	C4 (0,69)
Lorca	30024A00900037	v	0,4717 (12°)	0.5260 (13°)	C1 (0,00)
Lorca	30024A00900037	z	0,4616 (13°)	0.5261 (12°)	C1 (0,00)
Lorca	30024A03300013	w	0,4485 (14°)	0.4929 (14°)	C1 (0,00)
Lorca	30024A01400008	f	0,4452 (15°)	0.4882 (15°)	C1 (0,00)
Lorca	30024A01500025	a	0,4295 (16°)	0.4616 (16°)	C1 (0,00)
Lorca	30024A01600040	a	0,4189 (17°)	0.4456 (18°)	C1 (0,00)
Lorca	30024A28900002	a	0,4181 (18°)	0.4587 (17°)	C1 (0,00)
Murcia	30030A01500005	a	0,4036 (19°)	0.4351 (19°)	C4 (0,65)
Murcia	30030A01700006	l	0,4034 (20°)	0.4305 (20°)	C3 (0,83)

*Tabla 8.22.- Comparativa entre los métodos TOPSIS y ELECTRE-TRI
(localización de parques eólicos)*



8.5 Conclusiones de los resultados obtenidos

A continuación se procederá a detallar las principales conclusiones según los resultados obtenidos en el presente capítulo.

A. Selección de emplazamientos óptimos de instalaciones de EERR con gvSIG

Mediante sucesivos procesos de filtrado en función de límites proporcionados por expertos ha resultado posible reducir el número de alternativas iniciales en cada una de las tecnologías de EERR analizadas por lo que, este pseudo-método de decisión constituye una excelente herramienta para llevar a cabo un primer cribado de alternativas.

Comparando los resultados obtenidos de esta forma con los que ha proporcionado la metodología TOPSIS difusa se llega a la conclusión de que las mejores alternativas obtenidas mediante ambos procesos no son coincidentes. Para analizar la causa de dicha diferencia resulta necesario remontarse al fundamento de la metodología TOPSIS y a su combinación con AHP ya que, dicha combinación asigna un determinado coeficiente de importancia a los criterios que influyen en la decisión mientras que, en el proceso desarrollado con técnicas de filtrado en gvSIG, todos los criterios presentan el mismo peso.

B. Evaluación de las alternativas aplicando el método TOPSIS difuso

Se ha definido la capacidad de acogida para albergar instalaciones de EERR (concretamente energía solar fotovoltaica, termoeléctrica y eólica) en función de cuatro categorías (regular, buena, muy buena y excelente capacidad). Los resultados obtenidos indican que no hay notables diferencias entre dichas tecnologías ya que, tanto las alternativas con excelente capacidad de acogida como las alternativas asignadas a cualquier otra categoría (regular, buena y muy buena) presentan distribuciones muy similares.

El municipio de Lorca y limítrofes son los que presentan mayor número de alternativas con excelente capacidad de acogida para albergar instalaciones de esta índole. Coexisten



en el municipio de Lorca alternativas excelentes con alternativas que presentan regular capacidad de acogida a causa principalmente de la orografía del terreno y las consecuencias que se derivan de ella (accesibilidad, infraestructuras, etc.).

Las comarcas del Campo de Cartagena y del Mar Menor presentan un número muy reducido de alternativas con excelente capacidad de acogida y las superficies aptas son bastante escasas en comparación con otros municipios. La explicación a dichos resultados puede encontrarse en el marcado carácter urbanístico y agrícola de dicho territorio. En el municipio de Murcia ocurre algo parecido pero en este caso, la causa se debe principalmente a la catalogación de su suelo.

C. Evaluación, clasificación y comparación de las mejores alternativas mediante los métodos TOPSIS difuso, TOPSIS clásico y ELECTRE-TRI

Para las tres tecnologías renovables objeto de análisis, los resultados obtenidos mediante los métodos TOPSIS difuso y TOPSIS clásico son muy similares, existiendo a lo sumo una diferencia de una o dos posiciones entre una alternativa y otra. Por tanto las diferencias entre ambos métodos son escasas.

Comparando los resultados obtenidos con dichos métodos con la clasificación proporcionada por el método ELECTRE-TRI se observa que los resultados no llegan a ser coincidentes.

No obstante para el caso de búsqueda de emplazamientos óptimos para albergar huertos solares fotovoltaicos y plantas solares termoeléctricas, sí se aprecia una cierta semejanza entre las alternativas mejor valoradas con los métodos TOPSIS y las mejor clasificadas con el método ELECTRE-TRI.



CAPÍTULO IX

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN





“La verdadera ciencia enseña, por encima de todo, a dudar y a ser ignorante”.

Miguel de Unamuno

CAPÍTULO IX

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

9.1. Introducción

Durante el transcurso de la presente Tesis se han combinado los Sistemas de Información Geográfica con los métodos de decisión multicriterio con el objetivo de buscar y evaluar los emplazamientos óptimos para albergar instalaciones de energías renovables. En el análisis multicriterio, la evaluación se ha llevado a cabo mediante variables lingüísticas y numéricas por tanto, se han tenido en cuenta tanto los métodos operativos fuzzy como diversas herramientas de visualización y análisis gráfico que por un lado aportan rigor teórico y por otro potencian su aplicación práctica.

En este contexto, el objeto de este último capítulo es sintetizar las conclusiones de la presente investigación. En primer lugar, se recogerán las conclusiones correspondientes al estado del arte que corresponden con las Partes Primera y Segunda, seguidamente las conclusiones referentes a las aportaciones metodológicas de la tesis, vinculada con el Tercera Parte y finalmente se enunciarán las conclusiones específicas de la aplicación relacionada con los resultados obtenidos en la Cuarta Parte.

Una vez mostrada la totalidad de conclusiones obtenidas se enunciarán posibles líneas de investigación a realizar en un futuro ya sea respecto a las aportaciones metodológicas como a las posibles aplicaciones.



9.2. Conclusiones

9.2.1. Conclusiones correspondientes al estado del arte

En virtud al estado del arte estudiado en los primeros capítulos de la presente Tesis (Partes 1^a y 2^a) se puede concluir lo siguiente:

En relación a los Sistemas de Información Geográfica (SIG)

- La aplicación SIG permite operar aislada y conjuntamente con las más diversas variables, espacialmente consideradas. Cuando cada una de estas variables constituye un criterio a evaluar, esta forma de manejo de la información geográfica favorece el análisis multicriterio.
- Un SIG desarrollado para la toma de decisión multicriterio permite transformar y combinar datos geográficos con juicios de valor para obtener información útil y apropiada para la toma de decisiones.

9.2.2. Conclusiones correspondientes a las aportaciones metodológicas

En relación al Modelado Lingüístico Difuso y metodologías aplicadas

- Cuando tratamos con datos que representan algún tipo de vaguedad, incertidumbre, etc., el modelado lingüístico se presenta como una metodología apropiada que tiene como base teórica la Teoría de Conjuntos difusos. En este aspecto, se ha mostrado como una técnica eficaz para valorar aspectos de naturaleza cualitativa. Para representar los aspectos cualitativos como valores lingüísticos, se han utilizado etiquetas lingüísticas cuyo dominio de expresión es un conjunto de palabras o términos lingüísticos y su representación corresponde con la triplete que define el número difuso.
- En la etapa de ponderación de los criterios que influyen en la decisión se ha propuesto el empleo de la metodología AHP.



- En la etapa de evaluación de alternativas en el problema de decisión se ha propuesto el empleo del método TOPSIS difuso.
- Para la etapa de comparación de metodologías multicriterio mediante la valoración y clasificación de alternativas se han propuesto el método ELECTRE-TRI y los métodos TOPSIS clásico y difuso.

9.2.3. Conclusiones correspondientes a la aplicación de la Tesis Doctoral

En relación a la aplicación de la tesis, Búsqueda y evaluación de emplazamientos óptimos para albergar instalaciones de EERR en la costa de la Región de Murcia se puede concluir lo siguiente:

En relación a la selección de superficies aptas mediante el software gvSIG:

- Se ha comprobado que el litoral de la Región de Murcia es una zona óptima para implantar instalaciones solares fotovoltaicas, termoeléctricas y eólicas ya que, una vez que se ha considerado la totalidad de los criterios restrictivos o limitantes, hay un porcentaje bastante elevado de superficie apta disponible.
- Entre las diversas tecnologías estudiadas se observa que el mayor porcentaje de superficies óptimas se obtiene en instalaciones solares fotovoltaicas. Los porcentajes de superficies aptas para albergar parques eólicos y plantas solares termoeléctricas, aunque inferiores, son similares.
- Se ha creado una base de datos que constituye un punto de partida idóneo para evaluar la capacidad de acogida del Litoral de la Región de Murcia mediante la combinación de Sistemas de Información Geográfica con Sistemas de Ayuda a la Decisión del tipo Soft Computing (SIG-Soft Computing).

En relación con la Agregación de Información:

- El cuestionario diseñado para la extracción del conocimiento referente al peso de los criterios/subcriterios se realizó en base a la metodología AHP, en el que se



optimizó el número de preguntas en aras a que estuviera acotado y fuera asumible por los expertos que lo realizaran.

- Para obtener el peso de los criterios se ha agregado la información proporcionada por los expertos mediante la media geométrica y posteriormente se ha aplicado la metodología AHP.
- De igual modo, mediante la información proporcionada por los expertos, se han establecido los límites de las diferentes categorías que definen la capacidad de acogida para albergar instalaciones de EERR.

En relación a la combinación SIG-Soft computing

Este punto se desglosará en función de las diferentes metodologías multicriterio aplicadas para la evaluación, selección y clasificación de los emplazamientos óptimos para albergar instalaciones de EERR.

- Evaluación de las alternativas aplicando el método TOPSIS difuso en gvSIG
 - Según la evaluación llevada a cabo con el método TOPSIS difuso y la clasificación realizada en gvSIG se observa que más del 60 % de la superficie óptima presenta muy buena capacidad para albergar huertos solares fotovoltaicos, plantas solares termoeléctricas y parques eólicos.
- Selección de emplazamientos óptimos de instalaciones de EERR con gvSIG
 - Mediante las categorías definidas por los expertos ha resultado posible realizar procesos de filtrado con gvSIG para cada una de las tecnologías renovables a estudio.
 - En la selección de emplazamientos óptimos para albergar huertos solares fotovoltaicos, plantas solares termoeléctricas y parques eólicos, se ha logrado reducir las alternativas iniciales a únicamente un número muy reducido de alternativas.



- Comparación de las mejores alternativas mediante ELECTRE-TRI y los métodos TOPSIS clásico y difuso.
 - Los resultados obtenidos con el método TOPSIS difuso y el método TOPSIS clásico son muy similares para las tres tecnologías renovables analizadas.
 - Tanto para el caso de instalaciones solares fotovoltaicas como termoeléctricas se observa que, aunque no son completamente coincidentes los valores obtenidos mediante los métodos TOPSIS con la clasificación proporcionada por ELECTRE-TRI, la mayoría de las alternativas con mejor valoración, están situadas en la mejor categoría, generándose incluso coincidencia entre la alternativa mejor valorada y la situada en la mayor categoría.
 - Comparando los valores proporcionados por los métodos TOPSIS y la clasificación realizada con ELECTRE-TRI para el problema de localización de parques eólicos se observa que los valores son bastante dispares no llegando a establecerse excesiva concordancia. No obstante de las diez alternativas con mejor valoración, dos están situadas en la mejor y tres en la segunda mejor categoría. Sin embargo, en este caso no existe concordancia entre la alternativa mejor valorada y la situada en la categoría más elevada.

9.3. Líneas futuras de investigación

9.3.1. Recomendaciones para futuras investigaciones

Por la relativa novedad de este tipo de investigación, así como por el carácter transversal de su alcance, frente al cierre de esta tesis doctoral se abren un considerable número de futuras líneas de investigación, igualmente agrupadas según el siguiente esquema:

- Respecto a las aportaciones metodológicas
- Respecto a las aplicaciones



9.3.2. Futuras investigaciones en las aportaciones metodológicas

A continuación se describen de forma sintética las posibles líneas futuras de investigación en función de las aportaciones metodológicas de la tesis.

- Profundizar en el ámbito del modelado lingüístico difuso para la implementación en problemas de decisión multicriterio, donde la única información disponible es de tipo cualitativo.
- Profundizar en los métodos de agregación de la información de los expertos así como en los momentos de realización de dicha agregación.
- Ver que otros métodos podrían ser de aplicación en la determinación del peso de los criterios, como por ejemplo, el empleo de la media ponderada ordenada (operadores OWA).
- Dentro del método TOPSIS, profundizar en el estudio del paso correspondiente a la normalización de la matriz según los procedimientos planteados. Y analizar los más adecuados para la utilización de números difusos.
- Igualmente dentro del método TOPSIS, profundizar en el estudio del paso correspondiente al cálculo de las distancias al NIS y al PIS, implementando distintas metodologías.
- Profundizar en los métodos de defuzzificación a emplear y el momento en el que estos se aplican.
- Utilizar otro software de aplicación de ELECTRE-TRI que permita aumentar el número de alternativas a analizar y clasificar.
- Desarrollo de software SIG que integre los principales métodos multicriterio con interfaz dinámico que permita al usuario introducir los criterios, factores (con sus correspondientes capas temáticas asociadas), realizar las valoraciones pareadas y ejecutar la regla de decisión automáticamente.



- Ampliar la información correspondiente al número de expertos. o desarrollar nuevos sistemas de extracción del conocimiento a través de encuestas utilizando sistemas web o similares.

9.3.3. Futuras investigaciones en las aplicaciones

A continuación se describen de forma sintética las posibles líneas futuras de investigación en función de las posibles aplicaciones de la Tesis.

- Hacer extensible el caso de estudio a la totalidad del territorio de la Región de Murcia o a otras regiones en las que se desee implantar alguna de las instalaciones de energía renovables descritas.
- Aumentar el número de tecnologías renovables a implantar (biomasa, biogás, etc.) modificando el enfoque inicial de esta Tesis.
- Estudiar en profundidad la red de distribución de energía eléctrica con el objetivo de ampliar la información disponible de dicha capa temática y conocer la capacidad de la misma.
- Publicar los resultados obtenidos en un visor web donde se representen todas las capas temáticas utilizadas y las capas de resultados. De esta forma sería posible crear un servicio WMS para que los usuarios pudieran importar las capas temáticas a sus proyectos SIG.
- Incorporar otros tipos de información al sistema como por ejemplo datos de índole económica (inversión necesaria, selección del periodo de amortización, tasas de retorno...).
- Y finalmente, dado que la calidad de la información georreferenciada constituye uno de los puntos débiles de los SIG en la actualidad, incluir un análisis de sensibilidad de los resultados en función de los datos utilizados.



CHAPTER IX

CONCLUSIONS AND FUTURE RESEARCH





“La verdadera ciencia enseña, por encima de todo, a dudar y a ser ignorante”.

Miguel de Unamuno

CHAPTER IX

CONCLUSIONS AND FUTURE RESEARCH

9.1. Introduction

During the course of this Thesis, Geographic Information Systems have been combined with the multi criteria decision methods in order to find and evaluate the best locations to implement renewable energy facilities. In multi criteria analysis, assessment was carried out through linguistic and numerical variables and therefore, both fuzzy operating methods and various visualization tools and graphical analysis have been taken into account, which provide further theoretical rigor and enhance their practical application.

In this context, the purpose of this final chapter is to summarize the conclusions of this investigation. Initially, the findings will be collected for the state of the art matching the First and Second Parts followed by the findings concerning the methodological contributions of the Thesis, linked to the Third Part, and finally the specific findings of the application will be stated, related to the results obtained in Part Four.

Once all the conclusions have been shown possible research to be undertaken in the future either on methodological contributions or on possible applications will be mentioned.



9.2. Conclusions

9.2.1. Findings for the state of art

Under the state of art studied in the early chapters of this thesis (1st and 2nd Parts) we can conclude the following:

In relation to Geographic Information Systems (GIS).

- The GIS application allows to operate alone and in conjunction with the most diverse variables, spatially considered. When each of these variable is a criterion to evaluate, this form of geographic information handling favours multi criteria analysis.
- A GIS developed for multi criteria decision making allows to transform and combine geographic data with value judgments to obtain helpful information which is appropriate for decision making.

9.2.2. Determination for the methodological contributions

In relation to Fuzzy Linguistic Modelling and methodologies.

- When dealing with data representing some kind of vagueness, uncertainty, etc., linguistic modelling is presented as an appropriate methodology which is based on the theory of Fuzzy Sets Theory. In this aspect, it has been shown as an effective technique to assess qualitative aspects. The qualitative aspects such as linguistic values have been represented by linguistic labels whose expression domain is a set of words or linguistic terms and their representation corresponds to the triplet that defines the fuzzy number.
- At the stage of weighting the criteria that influence the decision, the use of the AHP methodology has been proposed.
- At the stage of evaluation of alternatives in the decision problem, the use of the fuzzy TOPSIS method has been proposed.



- For the comparison stage for multi methodologies by evaluating and ranking of alternatives the ELECTRE-TRI method and the classical and fuzzy TOPSIS methods have been proposed.

9.2.3. Determination for the implementation of the Doctoral Thesis

In relation to the application of the Thesis; research and evaluation of optimal locations to implement renewable energy facilities on the coast of the Region of Murcia the following can be concluded:

In relation to the selection of suitable surfaces by gvSIG software:

- It was found that the coastline of the Region of Murcia is an optimal area to implement solar photovoltaic, thermoelectric and wind facilities because once all of the restrictive criteria or limitations have been considered, there is a fairly high percentage of available suitable surface.
- Among the various technologies studied it is observed that the highest percentage of optimal surfaces is obtained for solar photovoltaic plants, the percentages of suitable areas to accommodate wind farms and thermoelectric solar plants, although lower, are similar.
- A database has been created which provides an ideal starting point for assessing the carrying capacity of the coast of the Region of Murcia by combining GIS with multi criteria decision methods.

In relation to the Aggregation of Information:

- The questionnaire designed for the extraction of knowledge concerning the weight of the criteria / subcriteria was based on the AHP methodology, in which the number of questions was optimized in order to be limited and manageable for the experts who were to complete it.
- To obtain the weight of the criteria the information provided by the experts has been added by the geometric average and then the AHP methodology has been applied.



- Similarly, using the information provided by the experts, limits have been established for the different categories that define the carrying capacity to implement renewable energy facilities.

In relation to the combination SIG-Soft Computing.

This point will be broken down according to the different methodologies applied to multi criteria evaluation, selection and optimal location to implement renewable energy facilities.

- Evaluation of alternatives using fuzzy TOPSIS method in gvSIG.
 - According to the assessment carried out with the fuzzy TOPSIS method and the classification made in gvSIG it is observed that over 60% of the optimal surface has very good capacity for photovoltaic solar plants, thermoelectric solar plants and wind farms.
- Optimal site selection of renewable energy facilities with gvSIG.
 - Through the categories defined by experts it has been proved possible to carry out filtering processes with gvSIG for each of the renewable technologies to study.
 - In selecting optimal locations to contain solar photovoltaic and thermoelectric plants and wind farms the initial alternatives have been reduced to only a very small number of alternatives.
- Comparison of the best alternatives using ELECTRE-TRI and classic and fuzzy TOPSIS methods.
 - The results obtained with the fuzzy TOPSIS method and the classic TOPSIS method are very similar for the three renewable technologies analyzed.
 - Both for the case of solar photovoltaic and thermoelectric it is observed that, while not completely coinciding with the values obtained by the TOPSIS



method with the classification provided by ELECTRE-TRI, most of the alternatives with better valuation are located in the best category, generating even better alternative coincidence between the most valued alternative and the alternative located in the upper category.

- Comparing the values provided by TOPSIS methods and the classification performed with ELECTRE-TRI for the problem of locating wind farms, it is observed that the values are quite different, not excessively reaching the agreement established. Of the ten best-rated alternatives, two are located in the best category and three in the second best category. However, in this case there is no concordance between the most valued alternative and the alternative placed in the upper category.

9.3. Future research

9.3.1. Recommendations for future research

Due to the relative novelty of this research, as well as the cross-cutting nature of its scope, to finish this thesis a considerable number of future research lines are opened, which are also grouped according to the following scheme:

- Regarding the methodological distributions
- Regarding applications

9.3.2. Future research in the methodological contributions

Possible future research, based on the methodological contributions of the thesis are summarized below.

- Deepen the field of fuzzy linguistic modeling for implementation in multi criteria decision problems, where the only information available is qualitative.
- Deepen aggregation methods of the expert information as well as the moments of achievement of such aggregation.



- See if other methods may be applicable in determining the weight of the criteria, such as for example, employing an ordered weighted average (OWA operators).
- Within the TOPSIS method, further study of the step corresponding to the normalization of the matrix according to the methods outlined. Also to analyze the most suitable for the use of fuzzy numbers.
- Also within the TOPSIS method, further study of the step corresponding to the calculation of distances to NIS and PIS, implementing different methodologies.
- Deepen defuzzification methods to use and the time at which these are applied.
- To use another software application that allows ELECTRE-TRI to increase the number of alternatives to analyze and classify.
- GIS software development that integrates the main multi dynamic interface that allows to input criteria, factors (with their associated thematic layers), to perform the paired valuations and execute the decision rule automatically.
- Further information corresponding to the number of experts, or develop new knowledge extraction through surveys using similar systems or web.

9.3.3. Future research in applications

Possible future research lines in terms of the possible applications of the Thesis are summarized below.

- Extend the case study to the entire territory of the Region of Murcia or to other areas where it is wished to implement any of the renewable energy facilities described.
- Increase the number of renewable technologies to expand (biomass, biogas, etc.) by modifying the initial focus of this Thesis.
- Study in depth the distribution of electricity in order to expand the information available on thematic layer and know its capacity.
- Publish the results in a web viewer where all the thematic layers used and the results layers are shown. In this way it would be possible to create a WMS service where users could import the thematic layers to their GIS projects.



- Incorporate other types of information to the system data such as economic information (investment required, selection of the amortization period, rates of return...)
- And finally, since the quality of geo-referenced information is currently one of the weaknesses of GIS, include a sensitivity analysis of the results based on the data used.



ANEXOS:

CUESTIONARIOS DE LA INVESTIGACIÓN



ANEXO I

OBTENCIÓN DEL PESO DE LOS CRITERIOS





ANEXO I

OBTENCIÓN DEL PESO DE LOS CRITERIOS

ENCUESTA PARA EXPERTOS EN ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

PROBLEMA

Elección de la mejor ubicación de huertos solares fotovoltaicos conectados a red en la Región de Murcia en función de unos criterios determinados.

La forma en la que se ha decidido afrontar el problema consiste en utilizar una herramienta tipo SIG (Sistema de Información Geográfica) en la cual, se introducirán en forma de capas los criterios que influyen en la elección de la mejor ubicación de un huerto solar fotovoltaico.

Mediante procesos de edición y análisis implementados en el GIS, se editarán y analizarán las capas de criterios con la finalidad de obtener valores numéricos que puedan ser exportados a herramientas o sistemas de ayuda a la decisión y de esta forma, poder aplicar metodología de decisión multicriterio.

CRITERIOS DE DECISIÓN

- C₁: Capacidad agrológica (Clases): Aquella que presenta un terreno para desarrollar la agricultura
- C₂: Pendiente del terreno (°)
- C₃: Orientación del terreno (Puntos cardinales)
- C₄: Área de la parcela (m²)
- C₅: Distancia a las principales carreteras (m)
- C₆: Distancia a redes eléctricas (m)
- C₇: Distancia a núcleos de población (m)
- C₈: Distancia a subestaciones transformadoras (m)
- C₉: Potencial solar de radiación anual (kJ·m²/día)
- C₁₀: Temperatura media anual (°C)



ENCUESTA.- VALORACIÓN DE CRITERIOS

1. ¿Cree que todos los criterios (C₁, C₂, C₃, C₄, C₅, C₆, C₇, C₈, C₉ y C₁₀) tienen el mismo peso a la hora de elegir la mejor ubicación de una planta solar fotovoltaica conectada a red?

Si No

2.- Escriba el orden de importancia que usted cree que debe tener cada uno de los criterios, a la hora de elegir la mejor ubicación de un huerto solar fotovoltaico conectado a red en la Región de Murcia (pueden tener igual importancia)

C ₁	<input type="checkbox"/> 1°	<input type="checkbox"/> 2°	<input type="checkbox"/> 3°	<input type="checkbox"/> 4°	<input type="checkbox"/> 5°	<input type="checkbox"/> 6°	<input type="checkbox"/> 7°	<input type="checkbox"/> 8°	<input type="checkbox"/> 9°	<input type="checkbox"/> 10°
C ₂	<input type="checkbox"/> 1°	<input type="checkbox"/> 2°	<input type="checkbox"/> 3°	<input type="checkbox"/> 4°	<input type="checkbox"/> 5°	<input type="checkbox"/> 6°	<input type="checkbox"/> 7°	<input type="checkbox"/> 8°	<input type="checkbox"/> 9°	<input type="checkbox"/> 10°
C ₃	<input type="checkbox"/> 1°	<input type="checkbox"/> 2°	<input type="checkbox"/> 3°	<input type="checkbox"/> 4°	<input type="checkbox"/> 5°	<input type="checkbox"/> 6°	<input type="checkbox"/> 7°	<input type="checkbox"/> 8°	<input type="checkbox"/> 9°	<input type="checkbox"/> 10°
C ₄	<input type="checkbox"/> 1°	<input type="checkbox"/> 2°	<input type="checkbox"/> 3°	<input type="checkbox"/> 4°	<input type="checkbox"/> 5°	<input type="checkbox"/> 6°	<input type="checkbox"/> 7°	<input type="checkbox"/> 8°	<input type="checkbox"/> 9°	<input type="checkbox"/> 10°
C ₅	<input type="checkbox"/> 1°	<input type="checkbox"/> 2°	<input type="checkbox"/> 3°	<input type="checkbox"/> 4°	<input type="checkbox"/> 5°	<input type="checkbox"/> 6°	<input type="checkbox"/> 7°	<input type="checkbox"/> 8°	<input type="checkbox"/> 9°	<input type="checkbox"/> 10°
C ₆	<input type="checkbox"/> 1°	<input type="checkbox"/> 2°	<input type="checkbox"/> 3°	<input type="checkbox"/> 4°	<input type="checkbox"/> 5°	<input type="checkbox"/> 6°	<input type="checkbox"/> 7°	<input type="checkbox"/> 8°	<input type="checkbox"/> 9°	<input type="checkbox"/> 10°
C ₇	<input type="checkbox"/> 1°	<input type="checkbox"/> 2°	<input type="checkbox"/> 3°	<input type="checkbox"/> 4°	<input type="checkbox"/> 5°	<input type="checkbox"/> 6°	<input type="checkbox"/> 7°	<input type="checkbox"/> 8°	<input type="checkbox"/> 9°	<input type="checkbox"/> 10°
C ₈	<input type="checkbox"/> 1°	<input type="checkbox"/> 2°	<input type="checkbox"/> 3°	<input type="checkbox"/> 4°	<input type="checkbox"/> 5°	<input type="checkbox"/> 6°	<input type="checkbox"/> 7°	<input type="checkbox"/> 8°	<input type="checkbox"/> 9°	<input type="checkbox"/> 10°
C ₉	<input type="checkbox"/> 1°	<input type="checkbox"/> 2°	<input type="checkbox"/> 3°	<input type="checkbox"/> 4°	<input type="checkbox"/> 5°	<input type="checkbox"/> 6°	<input type="checkbox"/> 7°	<input type="checkbox"/> 8°	<input type="checkbox"/> 9°	<input type="checkbox"/> 10°
C ₁₀	<input type="checkbox"/> 1°	<input type="checkbox"/> 2°	<input type="checkbox"/> 3°	<input type="checkbox"/> 4°	<input type="checkbox"/> 5°	<input type="checkbox"/> 6°	<input type="checkbox"/> 7°	<input type="checkbox"/> 8°	<input type="checkbox"/> 9°	<input type="checkbox"/> 10°

3.- Compare el criterio que usted ha considerado en primer lugar con respecto al que ha considerado en segundo y sucesivos, utilizando las siguientes etiquetas:

1° → 2° :	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> M+I	<input type="checkbox"/> +I	<input type="checkbox"/> Mu+I	<input type="checkbox"/> Ex+I
1° → 8° :	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> M+I	<input type="checkbox"/> +I	<input type="checkbox"/> Mu+I	<input type="checkbox"/> Ex+I
1° → 5° :	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> M+I	<input type="checkbox"/> +I	<input type="checkbox"/> Mu+I	<input type="checkbox"/> Ex+I
1° → 3° :	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> M+I	<input type="checkbox"/> +I	<input type="checkbox"/> Mu+I	<input type="checkbox"/> Ex+I
1° → 9° :	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> M+I	<input type="checkbox"/> +I	<input type="checkbox"/> Mu+I	<input type="checkbox"/> Ex+I
1° → 4° :	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> M+I	<input type="checkbox"/> +I	<input type="checkbox"/> Mu+I	<input type="checkbox"/> Ex+I
1° → 7° :	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> M+I	<input type="checkbox"/> +I	<input type="checkbox"/> Mu+I	<input type="checkbox"/> Ex+I
1° → 10° :	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> M+I	<input type="checkbox"/> +I	<input type="checkbox"/> Mu+I	<input type="checkbox"/> Ex+I
1° → 6° :	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> M+I	<input type="checkbox"/> +I	<input type="checkbox"/> Mu+I	<input type="checkbox"/> Ex+I

- II: Igualmente importante
- M+I: Moderadamente más importante
- +I: Más importante
- Mu+I: Mucho más importante
- Ex+I: Extremadamente más importante



ENCUESTA PARA EXPERTOS EN ENERGÍA EÓLICA

PROBLEMA

Elección de la mejor ubicación de parques eólicos en la Región de Murcia en función de unos criterios determinados.

La forma en la que se ha decidido afrontar el problema consiste en utilizar una herramienta tipo SIG (Sistema de Información Geográfica) en la cual, se introducirán en forma de capas los criterios que influyen en la elección de la mejor ubicación de un parque eólico.

Mediante procesos de edición y análisis implementados en el GIS, se editarán y analizarán las capas de criterios con la finalidad de obtener valores numéricos que puedan ser exportados a herramientas o sistemas de ayuda a la decisión y de esta forma, poder aplicar metodología de decisión multicriterio.

CRITERIOS DE DECISIÓN

- C₁: Capacidad agrológica (Clases): Aquella que presenta un terreno para desarrollar la agricultura
- C₂: Pendiente del terreno (°)
- C₃: Distancia a los principales aeropuertos (m)
- C₄: Área de la parcela (m²)
- C₅: Distancia a las principales carreteras (m)
- C₆: Distancia a redes eléctricas (m)
- C₇: Distancia a núcleos de población (m)
- C₈: Distancia a subestaciones transformadoras (m)
- C₉: Distancia a infraestructuras de telecomunicaciones (m)
- C₁₀: Velocidad media del viento anual (m/s)



ENCUESTA.- VALORACIÓN DE CRITERIOS

1. ¿Cree que todos los criterios (C₁, C₂, C₃, C₄, C₅, C₆, C₇, C₈, C₉ y C₁₀) tienen el mismo peso a la hora de elegir la mejor ubicación de un parque eólico?

Si No

2. Escriba el orden de importancia que usted cree que debe tener cada uno de los criterios, a la hora de elegir la mejor ubicación de un parque eólico en la Región de Murcia (pueden tener igual importancia)

C ₁	<input type="checkbox"/> 1º	<input type="checkbox"/> 2º	<input type="checkbox"/> 3º	<input type="checkbox"/> 4º	<input type="checkbox"/> 5º	<input type="checkbox"/> 6º	<input type="checkbox"/> 7º	<input type="checkbox"/> 8º	<input type="checkbox"/> 9º	<input type="checkbox"/> 10º
C ₂	<input type="checkbox"/> 1º	<input type="checkbox"/> 2º	<input type="checkbox"/> 3º	<input type="checkbox"/> 4º	<input type="checkbox"/> 5º	<input type="checkbox"/> 6º	<input type="checkbox"/> 7º	<input type="checkbox"/> 8º	<input type="checkbox"/> 9º	<input type="checkbox"/> 10º
C ₃	<input type="checkbox"/> 1º	<input type="checkbox"/> 2º	<input type="checkbox"/> 3º	<input type="checkbox"/> 4º	<input type="checkbox"/> 5º	<input type="checkbox"/> 6º	<input type="checkbox"/> 7º	<input type="checkbox"/> 8º	<input type="checkbox"/> 9º	<input type="checkbox"/> 10º
C ₄	<input type="checkbox"/> 1º	<input type="checkbox"/> 2º	<input type="checkbox"/> 3º	<input type="checkbox"/> 4º	<input type="checkbox"/> 5º	<input type="checkbox"/> 6º	<input type="checkbox"/> 7º	<input type="checkbox"/> 8º	<input type="checkbox"/> 9º	<input type="checkbox"/> 10º
C ₅	<input type="checkbox"/> 1º	<input type="checkbox"/> 2º	<input type="checkbox"/> 3º	<input type="checkbox"/> 4º	<input type="checkbox"/> 5º	<input type="checkbox"/> 6º	<input type="checkbox"/> 7º	<input type="checkbox"/> 8º	<input type="checkbox"/> 9º	<input type="checkbox"/> 10º
C ₆	<input type="checkbox"/> 1º	<input type="checkbox"/> 2º	<input type="checkbox"/> 3º	<input type="checkbox"/> 4º	<input type="checkbox"/> 5º	<input type="checkbox"/> 6º	<input type="checkbox"/> 7º	<input type="checkbox"/> 8º	<input type="checkbox"/> 9º	<input type="checkbox"/> 10º
C ₇	<input type="checkbox"/> 1º	<input type="checkbox"/> 2º	<input type="checkbox"/> 3º	<input type="checkbox"/> 4º	<input type="checkbox"/> 5º	<input type="checkbox"/> 6º	<input type="checkbox"/> 7º	<input type="checkbox"/> 8º	<input type="checkbox"/> 9º	<input type="checkbox"/> 10º
C ₈	<input type="checkbox"/> 1º	<input type="checkbox"/> 2º	<input type="checkbox"/> 3º	<input type="checkbox"/> 4º	<input type="checkbox"/> 5º	<input type="checkbox"/> 6º	<input type="checkbox"/> 7º	<input type="checkbox"/> 8º	<input type="checkbox"/> 9º	<input type="checkbox"/> 10º
C ₉	<input type="checkbox"/> 1º	<input type="checkbox"/> 2º	<input type="checkbox"/> 3º	<input type="checkbox"/> 4º	<input type="checkbox"/> 5º	<input type="checkbox"/> 6º	<input type="checkbox"/> 7º	<input type="checkbox"/> 8º	<input type="checkbox"/> 9º	<input type="checkbox"/> 10º
C ₁₀	<input type="checkbox"/> 1º	<input type="checkbox"/> 2º	<input type="checkbox"/> 3º	<input type="checkbox"/> 4º	<input type="checkbox"/> 5º	<input type="checkbox"/> 6º	<input type="checkbox"/> 7º	<input type="checkbox"/> 8º	<input type="checkbox"/> 9º	<input type="checkbox"/> 10º

3. Compare el criterio que usted ha considerado en primer lugar con respecto al que ha considerado en segundo y sucesivos, utilizando las siguientes etiquetas:

1º → 2º :	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> M+I	<input type="checkbox"/> +I	<input type="checkbox"/> Mu+I	<input type="checkbox"/> Ex+I
1º → 8º :	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> M+I	<input type="checkbox"/> +I	<input type="checkbox"/> Mu+I	<input type="checkbox"/> Ex+I
1º → 5º :	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> M+I	<input type="checkbox"/> +I	<input type="checkbox"/> Mu+I	<input type="checkbox"/> Ex+I
1º → 3º :	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> M+I	<input type="checkbox"/> +I	<input type="checkbox"/> Mu+I	<input type="checkbox"/> Ex+I
1º → 9º :	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> M+I	<input type="checkbox"/> +I	<input type="checkbox"/> Mu+I	<input type="checkbox"/> Ex+I
1º → 7º :	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> M+I	<input type="checkbox"/> +I	<input type="checkbox"/> Mu+I	<input type="checkbox"/> Ex+I
1º → 4º :	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> M+I	<input type="checkbox"/> +I	<input type="checkbox"/> Mu+I	<input type="checkbox"/> Ex+I
1º → 6º :	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> M+I	<input type="checkbox"/> +I	<input type="checkbox"/> Mu+I	<input type="checkbox"/> Ex+I
1º → 10º :	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> M+I	<input type="checkbox"/> +I	<input type="checkbox"/> Mu+I	<input type="checkbox"/> Ex+I

- II: Igualmente importante
- M+I: Moderadamente más importante
- +I: Más importante
- Mu+I: Mucho más importante
- Ex+I: Extremadamente más importante



ENCUESTA PARA EXPERTOS EN ENERGÍA SOLAR TERMICA DE ALTA TEMPERATURA (ENERGIA SOLAR TERMOELECTRICA)

PROBLEMA

Elección de la mejor ubicación de plantas solares termoeléctricas conectadas a red en la Región de Murcia en función de unos criterios determinados.

La forma en la que se ha decido afrontar el problema consiste en utilizar una herramienta tipo SIG (Sistema de Información Geográfica) en la cual, se introducirán en forma de capas los criterios que influyen en la elección de la mejor ubicación de una planta solar termoeléctrica.

Mediante procesos de edición y análisis implementados en el GIS, se editarán y analizarán las capas de criterios con la finalidad de obtener valores numéricos que puedan ser exportados a herramientas o sistemas de ayuda a la decisión y de esta forma, poder aplicar metodología de decisión multicriterio.

CRITERIOS DE DECISIÓN

- C₁: Capacidad agrológica (Clases): Aquella que presenta un terreno para desarrollar la agricultura
- C₂: Pendiente del terreno (°)
- C₃: Orientación del terreno (Puntos cardinales)
- C₄: Área de la parcela (m²)
- C₅: Distancia a las principales carreteras (m)
- C₆: Distancia a redes eléctricas (m)
- C₇: Distancia a núcleos de población (m)
- C₈: Distancia a subestaciones transformadoras (m)
- C₉: Potencial solar de radiación anual (kJ·m²/día)
- C₁₀: Temperatura media anual (°C)



ENCUESTA.- VALORACIÓN DE CRITERIOS

1. ¿Cree que todos los criterios ($C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8, C_9$ y C_{10}) tienen el mismo peso a la hora de elegir la mejor ubicación de una planta solar termoeléctrica conectada a red?

Si No

2.- Escriba el orden de importancia que usted cree que debe tener cada uno de los criterios, a la hora de elegir la mejor ubicación de una planta solar termoeléctrica conectada a red en la Región de Murcia (pueden tener igual importancia)

C_1	<input type="checkbox"/> 1°	<input type="checkbox"/> 2°	<input type="checkbox"/> 3°	<input type="checkbox"/> 4°	<input type="checkbox"/> 5°	<input type="checkbox"/> 6°	<input type="checkbox"/> 7°	<input type="checkbox"/> 8°	<input type="checkbox"/> 9°	<input type="checkbox"/> 10°
C_2	<input type="checkbox"/> 1°	<input type="checkbox"/> 2°	<input type="checkbox"/> 3°	<input type="checkbox"/> 4°	<input type="checkbox"/> 5°	<input type="checkbox"/> 6°	<input type="checkbox"/> 7°	<input type="checkbox"/> 8°	<input type="checkbox"/> 9°	<input type="checkbox"/> 10°
C_3	<input type="checkbox"/> 1°	<input type="checkbox"/> 2°	<input type="checkbox"/> 3°	<input type="checkbox"/> 4°	<input type="checkbox"/> 5°	<input type="checkbox"/> 6°	<input type="checkbox"/> 7°	<input type="checkbox"/> 8°	<input type="checkbox"/> 9°	<input type="checkbox"/> 10°
C_4	<input type="checkbox"/> 1°	<input type="checkbox"/> 2°	<input type="checkbox"/> 3°	<input type="checkbox"/> 4°	<input type="checkbox"/> 5°	<input type="checkbox"/> 6°	<input type="checkbox"/> 7°	<input type="checkbox"/> 8°	<input type="checkbox"/> 9°	<input type="checkbox"/> 10°
C_5	<input type="checkbox"/> 1°	<input type="checkbox"/> 2°	<input type="checkbox"/> 3°	<input type="checkbox"/> 4°	<input type="checkbox"/> 5°	<input type="checkbox"/> 6°	<input type="checkbox"/> 7°	<input type="checkbox"/> 8°	<input type="checkbox"/> 9°	<input type="checkbox"/> 10°
C_6	<input type="checkbox"/> 1°	<input type="checkbox"/> 2°	<input type="checkbox"/> 3°	<input type="checkbox"/> 4°	<input type="checkbox"/> 5°	<input type="checkbox"/> 6°	<input type="checkbox"/> 7°	<input type="checkbox"/> 8°	<input type="checkbox"/> 9°	<input type="checkbox"/> 10°
C_7	<input type="checkbox"/> 1°	<input type="checkbox"/> 2°	<input type="checkbox"/> 3°	<input type="checkbox"/> 4°	<input type="checkbox"/> 5°	<input type="checkbox"/> 6°	<input type="checkbox"/> 7°	<input type="checkbox"/> 8°	<input type="checkbox"/> 9°	<input type="checkbox"/> 10°
C_8	<input type="checkbox"/> 1°	<input type="checkbox"/> 2°	<input type="checkbox"/> 3°	<input type="checkbox"/> 4°	<input type="checkbox"/> 5°	<input type="checkbox"/> 6°	<input type="checkbox"/> 7°	<input type="checkbox"/> 8°	<input type="checkbox"/> 9°	<input type="checkbox"/> 10°
C_9	<input type="checkbox"/> 1°	<input type="checkbox"/> 2°	<input type="checkbox"/> 3°	<input type="checkbox"/> 4°	<input type="checkbox"/> 5°	<input type="checkbox"/> 6°	<input type="checkbox"/> 7°	<input type="checkbox"/> 8°	<input type="checkbox"/> 9°	<input type="checkbox"/> 10°
C_{10}	<input type="checkbox"/> 1°	<input type="checkbox"/> 2°	<input type="checkbox"/> 3°	<input type="checkbox"/> 4°	<input type="checkbox"/> 5°	<input type="checkbox"/> 6°	<input type="checkbox"/> 7°	<input type="checkbox"/> 8°	<input type="checkbox"/> 9°	<input type="checkbox"/> 10°

3.- Compare el criterio que usted ha considerado en primer lugar con respecto al que ha considerado en segundo y sucesivos, utilizando las siguientes etiquetas:

$1^\circ \rightarrow 2^\circ$:	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> M+I	<input type="checkbox"/> +I	<input type="checkbox"/> Mu+I	<input type="checkbox"/> Ex+I
$1^\circ \rightarrow 8^\circ$:	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> M+I	<input type="checkbox"/> +I	<input type="checkbox"/> Mu+I	<input type="checkbox"/> Ex+I
$1^\circ \rightarrow 5^\circ$:	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> M+I	<input type="checkbox"/> +I	<input type="checkbox"/> Mu+I	<input type="checkbox"/> Ex+I
$1^\circ \rightarrow 3^\circ$:	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> M+I	<input type="checkbox"/> +I	<input type="checkbox"/> Mu+I	<input type="checkbox"/> Ex+I
$1^\circ \rightarrow 9^\circ$:	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> M+I	<input type="checkbox"/> +I	<input type="checkbox"/> Mu+I	<input type="checkbox"/> Ex+I
$1^\circ \rightarrow 4^\circ$:	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> M+I	<input type="checkbox"/> +I	<input type="checkbox"/> Mu+I	<input type="checkbox"/> Ex+I
$1^\circ \rightarrow 7^\circ$:	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> M+I	<input type="checkbox"/> +I	<input type="checkbox"/> Mu+I	<input type="checkbox"/> Ex+I
$1^\circ \rightarrow 10^\circ$:	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> M+I	<input type="checkbox"/> +I	<input type="checkbox"/> Mu+I	<input type="checkbox"/> Ex+I
$1^\circ \rightarrow 6^\circ$:	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> M+I	<input type="checkbox"/> +I	<input type="checkbox"/> Mu+I	<input type="checkbox"/> Ex+I

II: Igualmente importante

M+I: Moderadamente más importante

+I: Más importante

Mu+I: Mucho más importante

Ex+I: Extremadamente más importante

ANEXO II

OBTENCIÓN DE LOS LÍMITES DE LAS CATEGORÍAS





ANEXO II

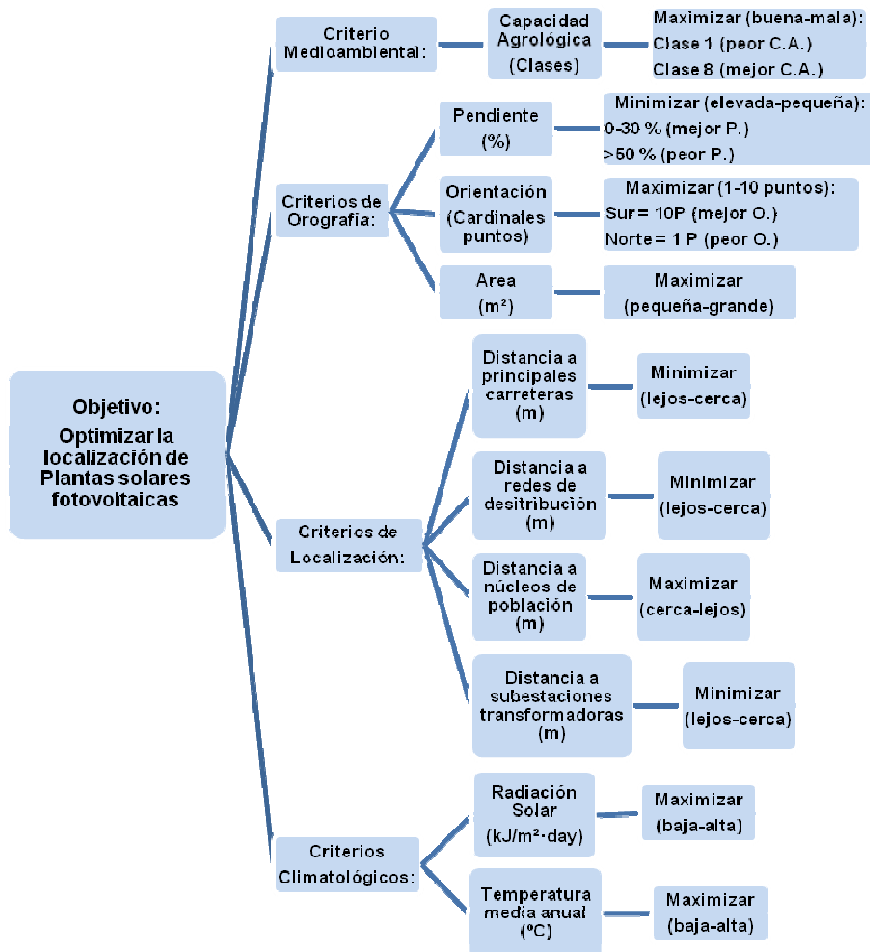
OBTENCIÓN DE LOS LÍMITES DE LAS CATEGORÍAS

EXPERTO EN ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA Y TERMOELÉCTRICA

PROBLEMA

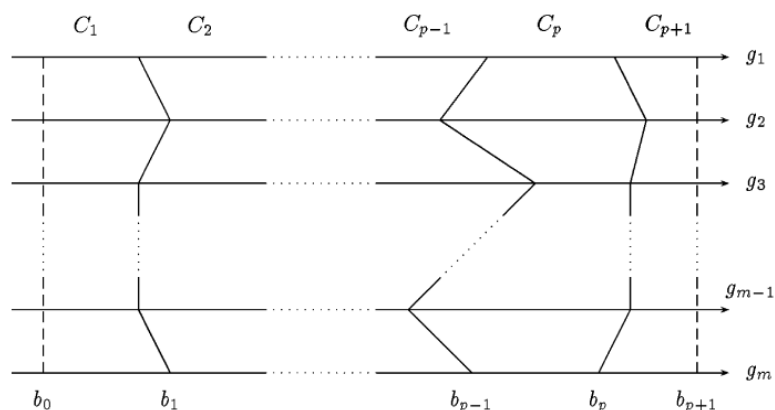
Selección de los límites de categorías que clasifican las superficies óptimas para albergar huertos solares fotovoltaicos y termoeléctricos conectados a red en la Región de Murcia.

La forma en la que se ha decidido afrontar el problema consiste en utilizar una herramienta tipo SIG (Sistema de Información Geográfica) en la cual, se introducirán en forma de capas los criterios que influyen en la elección de la mejor ubicación de un huerto solar. Las ubicaciones estarán clasificadas por parcelas catastrales y se evaluarán mediante métodos de decisión multicriterio. Entre los diversos métodos a utilizar se recurrirá al uso de ELECTRE-TRI para el que se definirá el siguiente árbol de criterios:





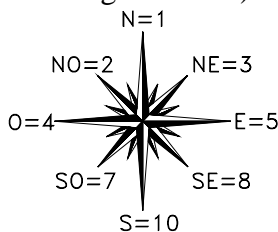
Las superficies óptimas (clasificadas en parcelas) se dividirán en cuatro categorías en función de su capacidad de acogida (regular, buena, muy buena y excelente) para albergar un huerto solar. La clasificación de las mismas se llevará a cabo mediante ELECTRE-TRI el cual asigna categorías a las diferentes alternativas a evaluar, esquemáticamente, sería de la forma siguiente:



Siendo:

- a_1, a_2, \dots, a_n : Alternativas a evaluar (parcelas óptimas)
- C_1, C_2, \dots, C_{p+1} : Categorías de las alternativas (en el caso de estudio C_1 : regular; C_2 =buena; C_3 =muy buena y C_4 = excelente)
- g_1, g_2, \dots, g_m : Criterios para evaluar las alternativas, en el caso de estudio:
 - g_1 =Capacidad agrológica (8 clases)
 - g_2 = área de la parcela (m^2)
 - g_3 = distancia a las principales carreteras (m)
 - g_4 = distancia a redes de distribución (m)
 - g_5 = distancia a subestaciones transformadoras (m)
 - g_6 = distancia a núcleos de población (m)
 - g_7 = potencia solar de radiación anual ($kJ/m^2 \cdot \text{dia}$)
 - g_8 = Pendiente del terreno (%)
 - g_9 = Orientación del terreno (puntos cardinales)(*)
 - g_{10} = Temperatura media anual ($^{\circ}C$)
- b_0, b_1, \dots, b_{p+1} : Límites entre categorías, en el caso a estudio:
 - b_1 : Límite entre categoría C_1 (regular) y C_2 (buena)
 - b_2 : Límite entre categoría C_2 (buena) y C_3 (muy buena)
 - b_3 : Límite entre categoría C_3 (muy buena) y C_4 (excelente)

(*): La orientación se definirá en base a los puntos cardinales los cuales se dividirán en clases valoradas desde 1 hasta 10 (tales valores serán extrapolados mediante etiquetas lingüísticas utilizando lógica difusa).





OBTENCIÓN DE LOS LÍMITES DE LAS DIFERENTES CATEGORÍAS PARA PLANTAS SOLARES FOTOVOLTAICAS

1. ¿Qué valores asignaría a los límites de las diferentes categorías (b_1 , b_2 y b_3) para cada uno de los criterios definidos?, a modo de referencia se proporcionan los valores máximos y mínimos de cada criterio obtenidos en gvSIG.

	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
	Clases	m ²	m	m	m	m	kJ/m ² ·día	%	Puntos Cardinales	°C
Mín.:	1	1.000	25	0	0	0	1.039,67	0	1	16,74
Máx.:	8	1.500.000	16.970	10.000	14.000	7.000	2.166,47	80	10	18,56
b_1										
b_2										
b_3										

OBTENCIÓN DE LOS LÍMITES DE LAS DIFERENTES CATEGORÍAS PARA PLANTAS SOLARES TERMOELÉCTRICAS

1. ¿Qué valores asignaría a los límites de las diferentes categorías (b_1 , b_2 y b_3) para cada uno de los criterios definidos?, a modo de referencia se proporcionan los valores máximos y mínimos de cada criterio obtenidos en gvSIG.

	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
	Clases	m ²	m	m	m	m	kJ/m ² ·día	%	Puntos Cardinales	°C
Mín.:	1	1.000	25	0	0	0	1.039,67	0	1	16,74
Máx.:	8	1.500.000	16.970	10.000	14.000	7.000	2.166,47	80	10	18,56
b_1										
b_2										
b_3										

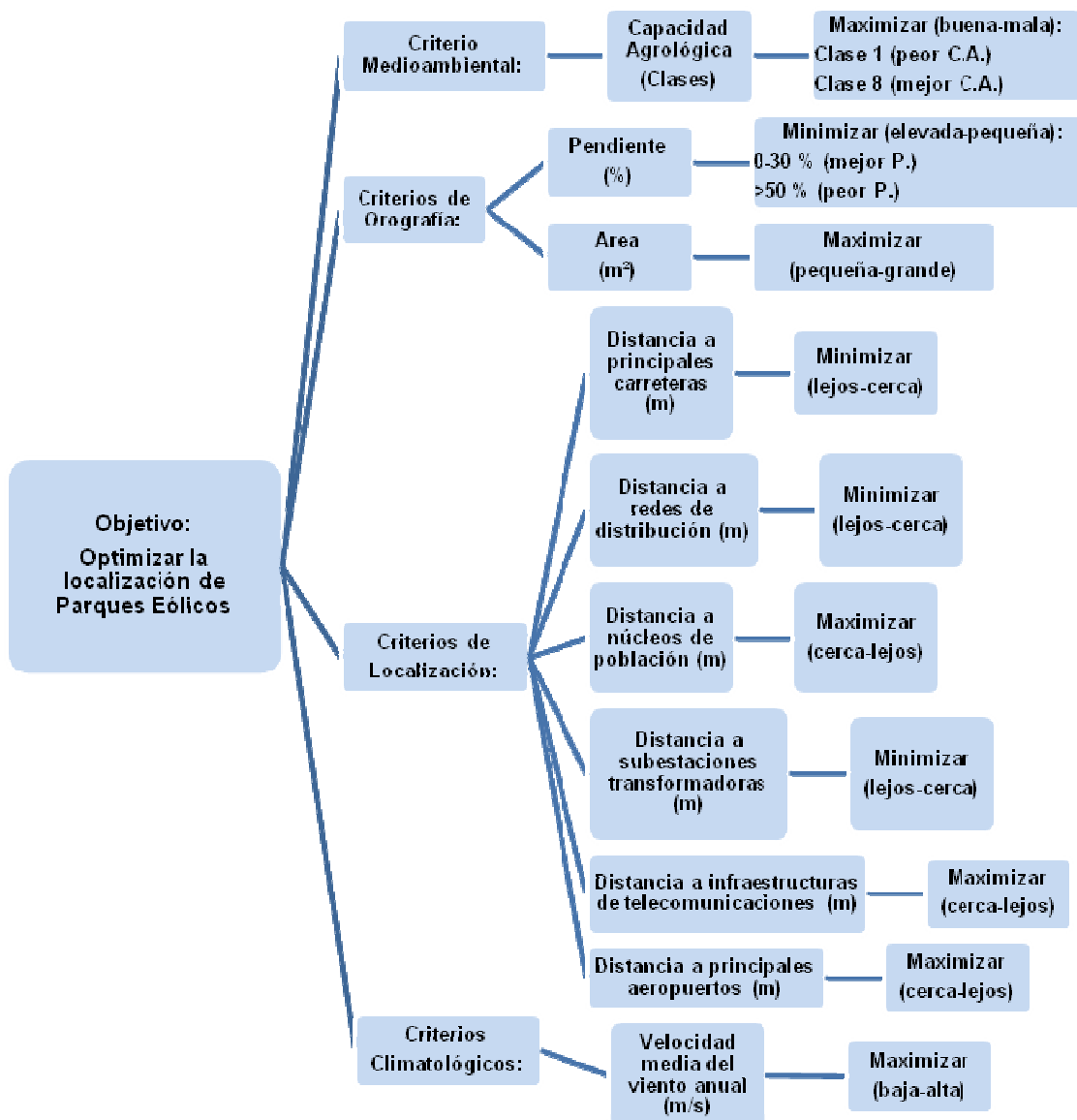


EXPERTO EN ENERGÍA EÓLICA

PROBLEMA

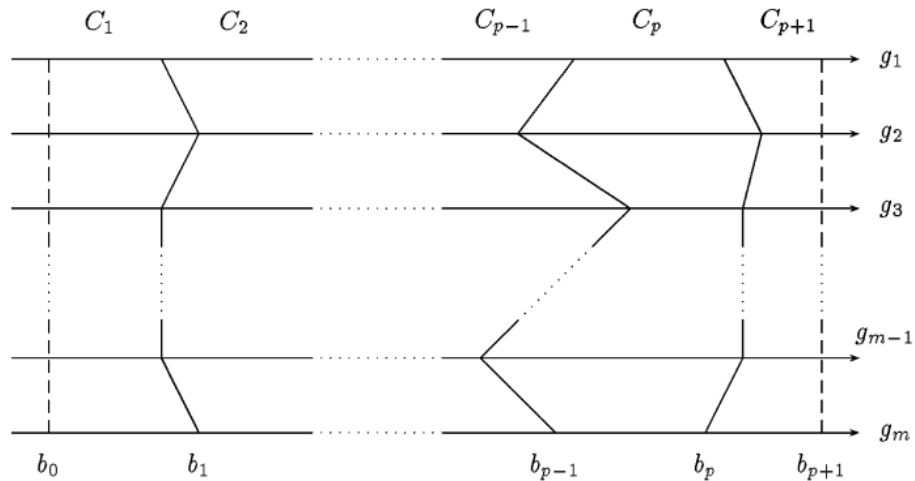
Selección de los límites de categorías que clasifican las superficies óptimas para albergar un parque eólico conectado a red en la Región de Murcia.

La forma en la que se ha decidido afrontar el problema consiste en utilizar una herramienta tipo SIG (Sistema de Información Geográfica) en la cual, se introducirán en forma de capas los criterios que influyen en la elección de la mejor ubicación de un parque eólico. Las ubicaciones estarán clasificadas por parcelas catastrales y se evaluarán mediante métodos de decisión multicriterio. Entre los diversos métodos a utilizar se recurrirá al uso de ELECTRE-TRI para el que se definirá el siguiente árbol de criterios:





Las superficies óptimas (clasificadas en parcelas) se dividirán en cuatro categorías en función de su capacidad de acogida (regular, buena, muy buena y excelente) para albergar un parque eólico. La clasificación de las mismas se llevará a cabo mediante ELECTRE-TRI el cual asigna categorías a las diferentes alternativas a evaluar, esquemáticamente, sería de la forma siguiente:



Siendo:

- a_1, a_2, \dots, a_n : Alternativas a evaluar (parcelas óptimas)
- C_1, C_2, \dots, C_{p+1} : Categorías de las alternativas (en el caso de estudio C_1 : regular; C_2 =buena; C_3 =muy buena y C_4 = excelente)
- g_1, g_2, \dots, g_m : Criterios para evaluar las alternativas, en el caso de estudio:
 - g_1 =Capacidad agrológica (8 clases)
 - g_2 = Pendiente del terreno (%)
 - g_3 = Distancia a los principales aeropuertos (m)
 - g_4 = Área de la parcela (m^2)
 - g_5 = Distancia a las principales carreteras (m)
 - g_6 = Distancia a redes de distribución (m)
 - g_7 = Distancia a núcleos de población (m)
 - g_8 = Distancia a subestaciones transformadoras (m)
 - g_9 = Distancia a infraestructuras de telecomunicaciones (m)
 - g_{10} = Velocidad media del viento anual (m/s)
- b_0, b_1, \dots, b_{p+1} : Límites entre categorías, en el caso a estudio:
 - b_1 : Límite entre categoría C_1 (regular) y C_2 (buena)
 - b_2 : Límite entre categoría C_2 (buena) y C_3 (muy buena)
 - b_3 : Límite entre categoría C_3 (muy buena) y C_4 (excelente)



OBTENCIÓN DE LOS LÍMITES DE LAS DIFERENTES CATEGORÍAS PARA PARQUES EÓLICOS

1. ¿Qué valores asignaría a los límites de las diferentes categorías (b_1 , b_2 y b_3) para cada uno de los criterios definidos?, a modo de referencia se proporcionan los valores máximos y mínimos de cada criterio obtenidos en gvSIG.

	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
	Clases	%	km	m ²	m	m	m	m	m	m/s
Mín.:	1	0	4	50.000	25	120	500	120	300	3
Máx.:	8	80	75	1.500.000	16.970	10.000	7.000	30.000	12.000	8
b_1										
b_2										
b_3										



