

**Universidad Politécnica de Valencia**  
Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

**Metodologías para la ubicación de plantas de  
biomasa mediante modelos de localización basados  
en programación lineal y evaluación multicriterio  
en el entorno de los Sistemas de Información  
Geográfica**

**TESIS DOCTORAL**

**PRESENTADA POR:**  
CAROLINA PERPIÑÁ CASTILLO

**DIRIGIDA POR:**  
DR. D. JOSÉ CARLOS MARTÍNEZ LLARIO  
DR. D. ÁNGEL PÉREZ-NAVARRO GÓMEZ

VALENCIA, ENERO DE 2012





**Metodologías para la ubicación de plantas de  
biomasa mediante modelos de localización basados  
en programación lineal y Evaluación multicriterio  
en el entorno de los Sistemas de Información  
Geográfica**

**MEMORIA PRESENTADA PARA LA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR POR:**  
CAROLINA PERPIÑÁ CASTILLO

**DIRIGIDA EN EL DEPARTAMENTO POR:**  
DR. D. JOSÉ CARLOS MARTÍNEZ LLARIO

**PROGRAMA DE DOCTORADO:** GEODESIA, CARTOGRAFÍA Y SISTEMAS DE  
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

VALENCIA, ENERO DE 2012





**Metodologías para la ubicación de plantas de biomasa mediante modelos de localización basados en programación lineal y Evaluación multicriterio en el entorno de los Sistemas de Información Geográfica**

**MEMORIA PRESENTADA PARA LA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR POR:  
CAROLINA PERPIÑÁ CASTILLO**

**DIRIGIDA EN EL INSTITUTO DE INGENIERÍA ENERGÉTICA POR:  
DR. D. ÁNGEL PÉREZ-NAVARRO GÓMEZ**

**TESIS DOCTORAL ENMARCADA EN EL PROGRAMA DE FORMACIÓN DE PERSONAL INVESTIGADOR (FPI) DE MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN. CONVOCATORIA 2007-2011**

VALENCIA, ENERO DE 2012



“El *Ayer* es historia.  
El *Mañana* es un misterio.  
El *Hoy* es un regalo, por eso se le llama *presente*”

A Irene, con todo mi amor.





## AGRADECIMIENTOS

---

Mediante las siguientes líneas, y una vez finalizado el largo camino para concluir el presente trabajo, quiero agradecer a muchas personas e instituciones el apoyo que he recibido en el ámbito profesional, personal y económico, de una manera directa o indirectamente.

En primer lugar, quiero hacer constar mi mas sincero agradecimiento a mis directores de tesis Don Ángel Pérez-Navarro y Don José Carlos Martínez, por su implicación, su rigurosidad científica, por sus consejos y sugerencias siempre desde un punto de vista constructivo, así como por la confianza que han depositado en mí durante los últimos años.

Una mención también especial se merecen los miembros del Instituto de Ingeniería Energética (IIE mi coordinador David Alfonso Solar, así como también a Elisa Peñalvo, quienes me iniciaron en la I+D+i dentro de la Universidad Politécnica de Valencia en el área de las Energías Renovables, y donde he crecido como investigadora desde hace más de cinco años. Por supuesto, quiero agradecer a cada uno mis compañeros y colegas del IIE, sobre todo a los de los grupos de biomasa y DERD, con los que he compartido, disfrutado, reído y aprendido. A Fernando, Guillermo, Amada, Manolo, Carlos, Rogelio, Natalia, David, Tim, Edo, Oscar, María, Jaber, Javi, Elisa, Harald y a aquellos que ya no estáis...mil gracias!

Al Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, por las enseñanzas recibidas durante mi etapa de estudiante de doctorado y por concederme la oportunidad de realizar mis primeras clases como docente en la E.T.S.I. Geodésica, Cartográfica y Topográfica, bajo la tutela de José Carlos Martínez y Eloina Coll.

También deseo expresar mi gratitud al Ministerio de Ciencia y Tecnología, por concederme la beca/contrato de investigación del programa de Ayudas para la concesión de personal investigador del Plan Nacional asociada al proyecto “Segmentación de la demanda y estudio del potencial de la biomasa como recurso energético distribuido renovable para aplicaciones térmicas, cogeneración y biocombustibles” (ENE2006-08246), sobre el cual se ha desarrollado parte del contenido de este trabajo doctoral.

Por encima de todo, quiero agradecerle a mi pequeña Irene, el tiempo que le robé durante sus primeros meses de vida, para poder “empezar a concluir” esta memoria y para que así, algún día, pueda sentirse orgullosa de su madre, y sepa que ella también participó. A mi madre, Mari Carmen, que me ha sustituido y ayudado gustosamente en mis tareas domesticas y maternas ejerciendo como una fantástica abuela, pudiéndome “escapar” al ordenador día tras día. También le agradezco a mi compañero, pareja, padre de mi hija y amigo, Fran, y a mi padre, Vicente, porque ellos siempre han creído en mi, y siempre los tengo para lo que necesite.



<b>CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>19</b>
1.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN .....	27
1.1.1. Políticas de fomento de las energías renovables: Marco Europeo .....	27
1.1.2. Políticas de fomento de las energías renovables: Marco Nacional .....	29
1.1.3. Situación energética: Marco Mediterráneo (Comunidad Valenciana) .....	30
1.1.4. Proyectos de investigación precedentes realizados en el Instituto de Ingeniería Energética referidos a la integración de la biomasa como fuente energética .....	32
1.1.5. Introducción y objetivos del proyecto “BIODER: Segmentación de la demanda y estudio del potencial de la biomasa como recurso energético distribuido renovable para aplicaciones térmicas, cogeneración y biocombustibles” .....	33
1.2. JUSTIFICACIÓN Y DEFINICIÓN DE OBJETIVOS.....	34
1.3. ESTADO DEL ARTE .....	37
1.3.1. Diferentes estrategias para la evaluación de la biomasa agrícola y forestal .....	39
1.3.2. Logística y cálculo de costes de transporte .....	41
1.3.3. Localización óptima de instalaciones .....	44
1.3.4. Evaluación multicriterio y Sistemas de Información geográfica .....	48
1.4. ÁREA DE ESTUDIO .....	51
1.5. FUENTES DE INFORMACIÓN ESTADÍSTICAS Y CARTOGRÁFICAS .....	56
1.6. CONTENIDOS Y ESTRUCTURA DE LA TESIS .....	58
<b>CAPÍTULO 2. CONCEPTOS GENERALES DE UN SISTEMA DE TRANSPORTE.....</b>	<b>61</b>
2.1. INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS DE REDES .....	63
2.2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE UN SISTEMA DE TRANSPORTE .....	64
2.3. INTRODUCCIÓN A LA LOGÍSTICA Y OPTIMIZACIÓN DEL TRANSPORTE .....	65
2.3.1. Componentes y factores de decisión en Logística .....	66
2.3.2. Progreso y evolución en el sector del transporte .....	66
2.3.3. Componentes de un sistema de distribución física .....	67
2.3.4. Configuración de un sistema de distribución física .....	68
2.4. RELACIÓN INDUSTRIA-TRANSPORTE. COSTES DE TRASPORTE .....	69
2.5. COSTES DE TRASPORTE EN LA GESTIÓN DE RECUSOS BIOMASICOS .....	71
2.5.1. Función de costes de transporte para la recogida de biomasa .....	71
2.6. REPRESENTACIÓN DIGITAL DE REDES DE TRANSPORTE .....	73
2.7. DETERMINACIÓN DE LAS DISTANCIAS Y RECORRIDOS .....	75
2.8. COCLUSIONES DEL CAPÍTULO .....	76
<b>CAPÍTULO 3. INTRODUCCIÓN A LA PROGRAMACIÓN LINEAL Y A LA TEORÍA DE LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE INSTALACIONES.....</b>	<b>77</b>
3.1. INTRODUCCIÓN A LA PROGRAMACIÓN LINEAL Y ALGORITMOS DE CÁLCULO PARA RESOLUCIÓN DE MODELOS Y OTROS PROBLEMAS .....	79
3.1.1. Introducción .....	79
3.1.2. Consideraciones generales de la programación lineal .....	80
3.1.3. El problema del transporte (The transportation problem) .....	87
3.1.4. El problema de asignación (the allocation problem) .....	90
3.1.5. El problema del camino más corto (The shortest path problem) .....	92
3.1.6. Métodos para resolución de problemas NP-duros .....	94
3.2. INTRODUCCIÓN A LA TEORÍA DE LA LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE INSTALACIONES .....	99
3.2.1. Introducción .....	99
3.2.2. Factores de un problema de localización .....	101
3.2.3. Diferentes tipos de problemas en la localización de instalaciones .....	101
3.2.4. Clasificación de los modelos de localización .....	106
3.2.5. Modelos de localización: Instalaciones deseables .....	109
3.2.6. Modelos de localización: Instalaciones no deseables .....	115
3.2.7. Extensión de los modelos de localización básicos .....	119
3.2.8. La integración de los SIG en la localización de instalaciones .....	121
3.3. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO .....	123

<b>CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN MULTICRITERIO EN ENTORNOS SIG .....</b>	<b>125</b>
4.1. INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS MULTICRITERIO .....	126
4.2. ELEMENTOS BÁSICOS EN LA EMC APLICADA A LOS SIG .....	127
4.2.1. Definición del problema y objetivos .....	127
4.2.2. Alternativas. Conjunto de elección .....	128
4.2.3. Criterios de la evaluación .....	128
4.2.4. Reglas de decisión y pesos .....	128
4.2.5. Matrices en una EMC .....	129
4.2.6. Etapas de la aplicación de una EMC en un SIG .....	130
4.3. SELECCIÓN DE LOS CRITERIOS DE EVALUACIÓN .....	131
4.3.1. Generación de los mapas de criterios y limitantes. Escala de medida .....	132
4.4. MÉTODOS DE PONDERACIÓN DE CRITERIOS Y REGLAS DE DECISIÓN .....	133
4.4.1. Clasificación de los métodos de ponderación de criterios .....	134
4.4.2. Clasificación de las técnicas de EMC. Reglas de decisión .....	137
4.5. NORMALIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS .....	145
4.6. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y PROPAGACIÓN DE ERRORES .....	146
4.6.1. Métodos pantalla (screening methods) .....	147
4.6.2. Métodos locales .....	148
4.6.3. Métodos globales .....	148
4.6.4. Propagación del error .....	151
4.7. VALORACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ACOGIDA DE UN TERRITORIO APLICANDO TÉCNICAS DE EMC-SIG .....	154
4.7.1. Técnicas para la evaluación de impacto ambiental .....	154
4.7.2. Factores que intervienen en la localización y evaluación de una actividad .....	155
4.8. IMPLEMENTACIÓN DE UNA EMC EN UN ENTORNO SIG .....	157
4.9. COCLUSIONES DEL CAPÍTULO .....	159
<b>CAPÍTULO 5. EVALUACIÓN, ESTRATEGIAS LOGÍSTICAS Y TRANSPORTE DE LOS RECURSOS BIOMÁSICOS. METODOLOGÍAS PARA LA LOCALIZACIÓN DE PLANTAS DE BIOMASA.....</b>	<b>163</b>
5.1. INTRODUCCIÓN .....	165
5.2. METODOLOGÍA DESARROLLADA EN EL PROYECTO BIODER BASADA EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA .....	166
5.2.1. Resumen de la metodología basada en SIG del proyecto BIODER .....	166
5.2.2. Evaluación y caracterización de los recursos de la biomasa .....	166
5.2.3. Optimización de la logística y el transporte .....	167
5.2.4. Resultados de la valoración de la biomasa disponible y de las mejores ubicaciones para la instalación de plantas de biomasa a nivel comarcal .....	168
5.3. GRADO DE ADECUACIÓN DE UN TERRITORIO PARA LA UBICACIÓN DE UNA PLANTA DE BIOMASA UTILIZANDO TÉCNICAS DE EMC-SIG .....	171
5.3.1. Establecimiento de los criterios (variables): factores y limitantes .....	171
5.3.2. Desarrollo de las matrices de comparación por pares, cálculo de los pesos de los criterios y ratios de consistencia .....	178
5.3.3. Establecimiento de las reglas de decisión .....	185
5.3.4. Obtención del mapa de alternativas para el objeto del estudio .....	186
5.3.5. Análisis de sensibilidad de la EMC .....	192
5.4. APLICACIÓN DE MODELOS DE LOCALIZACIÓN BASADOS EN PROGRAMACIÓN LINEAL ENTERA PARA LA UBICACIÓN DE PLANTAS DE BIOMASA .....	200
5.4.1. Localización óptima aplicando el problema P-Mediano .....	203
5.4.2. Localización óptima aplicando el problema de máxima cobertura .....	216
5.4.3. Determinación de localizaciones mediante la matriz Origen-Destino .....	222
5.4.4. Comportamiento de las distancias y los costes en las diferentes estrategias planteadas .....	226
5.5. CONCLUSIONES Y DISCUSIONES DEL CAPÍTULO .....	228
5.5.1. Conclusiones específicas de la metodología basada en SIG del proyecto BIODER .....	229
5.5.2. Conclusiones globales y específicas del grado de adecuación de una planta de biomasa mediante técnicas de EMC-SIG .....	233
5.5.3. Conclusiones globales y específicas de la aplicación de modelos de localización basados en programación lineal en la ubicación óptima de plantas de biomasa .....	237

<b>CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES GENERALES.....</b>	<b>243</b>
<b>CAPÍTULO 7. DIVULGACIÓN DEL CONOCIMIENTO: ARTÍCULOS Y CONGRESOS.....</b>	<b>249</b>
<b>CAPÍTULO 8. PROYECTOS FUTUROS.....</b>	<b>253</b>
<b>CAPÍTULO 9. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>257</b>
<b>ANEXO I. CONCEPTOS GENERALES DE LAS ENERGÍAS RENOVABLEs.....</b>	<b>267</b>
<b>ANEXO II. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA SIG EN LAS PROVINCIAS DE VALENCIA, CIUDAD REAL Y LUGO.....</b>	<b>279</b>
<b>ANEXO III. MATRICES DE COMPARACIÓN POR PARES DE LOS FACTORES EMPLEADOS EN LA EMC.....</b>	<b>333</b>
<b>ANEXO IV. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS FACTORES EN LA EMC.....</b>	<b>361</b>
<b>ANEXO V. INFORMACIÓN ASOCIADA A LA METODOLOGÍA A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE MODELOS DE LOCALIZACIÓN.....</b>	<b>371</b>
<b>ANEXO VI. PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DEL ANALISIS DE REDES EN aRCINFO WORSTATION.....</b>	<b>375</b>

<i>Figura 1. Consumo de la energía primaria en la Unión Europea-25, 2004</i> .....	27
<i>Figura 2. Estructura de generación eléctrica en la Unión Europea-25, 2003</i> .....	28
<i>Figura 3. Consumo de la energía primaria por fuentes en España, 2005.</i> <i>Fuente: Ministerio de Industria, Turismo y Comercio</i> .....	29
<i>Figura 4. Estructura de la generación eléctrica en España, 2005.</i> <i>Fuente: Ministerio de Industria, Turismo y Comercio</i> .....	30
<i>Figura 5. Mapa de localización de las provincias bajo estudio</i> .....	52
<i>Figura 6. Mapa de Localización de la Comarca de Utiel-Requena</i> .....	54
<i>Figura 7. Tipos de cultivos y Especies forestales en la Comarca de Utiel-Requena</i> .....	55
<i>Figura 8. Ejemplo de la representación de redes digitales (nudos y aristas)</i> .....	74
<i>Figura 9. Representación en forma de grafo del problema del transporte</i> .....	88
<i>Figura 10. Clasificación de modelos y problemas de localización de instalaciones.</i> ...	109
<i>Figura 11. Matriz de evaluación. Fuente: (Malczewski 1999)</i> .....	129
<i>Figura 12. Matriz de prioridades. Fuente: (Gómez 2005)</i> .....	129
<i>Figura 13. Matriz de valoración. Fuente: (Gómez 2005)</i> .....	130
<i>Figura 14. Esquema general de un proceso de decisión multicriterio</i> .....	131
<i>Figura 15. Clasificación de las técnicas de EMC. Fuente: (Gómez 2005)</i> .....	138
<i>Figura 16. Esquema de las operaciones realizadas para el tratamiento del error.</i> .....	152
<i>Figura 17. Resultados globales de la Comarca de Utiel-Requena</i> .....	170
<i>Figura 18. Limitantes naturales y artificiales de la Comarca de Utiel-Requena</i> .....	182
<i>Figura 19. Calificación del suelo de la Comarca de Utiel-Requena.</i> .....	183
<i>Figura 20. Calificación del suelo de la Comarca de Utiel-Requena.</i> .....	184
<i>Figura 21. Adecuación de la comarca de Utiel-Requena para la instalación de una planta de biomasa utilizando la Sumatoria Lineal Ponderada</i> .....	187
<i>Figura 22. Adecuación de la comarca de Utiel-Requena para la instalación de una planta de biomasa utilizando el método del Punto Ideal</i> .....	189
<i>Figura 23. Resultados del análisis de sensibilidad a partir del método Fast extendido sin variaciones en los pesos (constantes)</i> .....	195
<i>Figura 24. Resultados del análisis de sensibilidad a partir del método Sobol'</i> .....	196
<i>Figura 25. Resultados del análisis de sensibilidad a partir del método E-FAST</i> .....	198
<i>Figura 26. Resultados del análisis de sensibilidad a partir del método Morris</i> .....	199
<i>Figura 27. Elementos comunes utilizados en los modelos de localización</i> .....	201
<i>Figura 28. Representación de las cinco mejores ubicaciones globales a partir del p-mediano</i> .....	205
<i>Figura 29. Distribución de parcelas y gestión de la biomasa en el interior de cada km2 de la malla regular</i> .....	206
<i>Figura 30. Ejemplo de las operaciones de recogida de biomasa a "pie de campo"</i> .....	207
<i>Figura 31. Estructura del problema de localización con jerarquías para la ubicación óptima de una planta de biomasa</i> .....	208
<i>Figura 32. Representación espacial de la localización de los centros de transferencia (2, 4, 6, 8 y 16) y la asignación de la demanda (biomasa)</i> .....	211
<i>Figura 33. Localización de centros de transferencia a partir del p-mediano con jerarquías</i> .....	214
<i>Figura 36. Representación de las cinco mejores ubicaciones globales a partir del modelo de máxima cobertura</i> .....	219
<i>Figura 37. Relación entre el número de centros de transferencia en función de la distancia total ponderada (línea verde) y la biomasa que es asignada (línea azul)</i> .....	221
<i>Figura 38. Representación de las cinco mejores y peores ubicaciones para la localización de una planta de biomasa a partir de la matriz Origen-Destino</i> .....	224

<i>Figura 39. Relación entre el coste global de cada ubicación potencial y los kilómetros recorridos por cada una de ellas.....</i>	225
<i>Figura 40. Comparación entre modelos respecto a las distancias totales ponderadas</i>	227
<i>Figura 41. Comparación entre modelos respecto a las distancias medias y máximas .</i>	227
<i>Figura 42. Caracterización, distribución y potencial energético de la biomasa en Valencia.....</i>	290
<i>Figura 43. Áreas predominantes (ha) forestales en la Provincia de Valencia.....</i>	291
<i>Figura 44. Distribución de las ubicaciones potenciales en Valencia.....</i>	300
<i>Figura 45. Aplicación de la metodología en la comarca de Los Serranos .....</i>	301
<i>Figura 46. Ejemplo de la aplicación de la metodología en la comarca de L'Horta de Valencia (fase de distribución).....</i>	306
<i>Figura 47. Resultado globales de la Comarca de valles d'Albaida .....</i>	310
<i>Figura 48. Resultado globales de la Comarca de Valle de Ayora .....</i>	311
<i>Figura 49. Resultado globales de la Comarca de La Hoya de Buñol .....</i>	312
<i>Figura 50. Resultado globales de la Comarca de Campos de Llíria .....</i>	313
<i>Figura 51. Resultado globales de la Comarca de La Costera de Játiva .....</i>	314
<i>Figura 52. Resultado globales de la Comarca de Enguera y La Canal.....</i>	315
<i>Figura 53. Resultado globales de la Comarca de Gandía .....</i>	316
<i>Figura 54. Resultado globales de la Comarca de L'Horta de València .....</i>	317
<i>Figura 55. Resultado globales de la Comarca de Requena-Utiel .....</i>	318
<i>Figura 56. Resultado globales de la Comarca de Las Riberas de Júcar .....</i>	319
<i>Figura 57. Resultado globales de la Comarca de Sagunto .....</i>	320
<i>Figura 58. Resultado globales de la Comarca Central.....</i>	321
<i>Figura 59. Resultado globales de la Comarca Costa.....</i>	322
<i>Figura 60. Resultado globales de la Comarca Montaña.....</i>	323
<i>Figura 61. Resultado globales de la Comarca Sur .....</i>	324
<i>Figura 62. Resultado globales de la Comarca de Terra Chá.....</i>	325
<i>Figura 63. Resultado globales de la Comarca de Campo de Calatrava.....</i>	326
<i>Figura 64. Resultado globales de la Comarca de Montiel.....</i>	327
<i>Figura 65. Resultado globales de la Comarca de La Mancha.....</i>	328
<i>Figura 66. Resultado globales de la Comarca de Montes Norte .....</i>	329
<i>Figura 67. Resultado globales de la Comarca de Montes Sur.....</i>	330
<i>Figura 68. Resultado globales de la Comarca de Pastos.....</i>	331
<i>Figura 69. Mapa de pendientes de la Comarca de Utiel-Requena .....</i>	336
<i>Figura 70. Unidades Litológicas en la Comarca de Utiel-Requena .....</i>	338
<i>Figura 71. Tipos de Cultivos y especies forestales en la Comarca de Utiel-Requen ....</i>	340
<i>Figura 72. Cobertura vegetal natural de la Comarca de Utiel-Requena.....</i>	342
<i>Figura 73. Red de Comunicación de la Comarca Utiel-Requena .....</i>	344
<i>Figura 74. Fisiografía de la Comarca de Utiel-Requena .....</i>	346
<i>Figura 75. Biomasa disponible (t/ha) en la Comarca de Utiel-Requena .....</i>	348
<i>Figura 76. Desarrollo Económico municipal de la Comarca de Utiel-Requena .....</i>	350
<i>Figura 77. Demanda Potencial local municipal (Ktep) y biomasa disponible municipal (t/año) de la Comarca de Utiel-Requena.....</i>	352
<i>Figura 78. Población afectada por la instalación de una planta de biomasa en la Comarca de Utiel-Requena .....</i>	354
<i>Figura 79. Coste de transporte (€/t) en la Comarca de Utiel-Requena .....</i>	356
<i>Figura 80. Geomorfología en la Comarca de Utiel-Requena .....</i>	358
<i>Figura 81. Coste de transporte. Distribución Uniforme .....</i>	363
<i>Figura 82. Litología. Distribución: discreta .....</i>	364

## LISTA DE FIGURAS

---

<i>Figura 83. Biomasa. Distribución uniforme.....</i>	<i>364</i>
<i>Figura 84. Población afectada. Distribución discreta.....</i>	<i>365</i>
<i>Figura 85. Pendiente del terreno. Distribución uniforme.....</i>	<i>365</i>
<i>Figura 86. Cobertura vegetal natural. Distribución discreta.....</i>	<i>366</i>
<i>Figura 87. Tipos de cultivos. Distribución uniforme.....</i>	<i>366</i>
<i>Figura 88. Fisiografía. Distribución discreta.....</i>	<i>367</i>
<i>Figura 89. Demanda Potencial. Distribución discreta.....</i>	<i>367</i>
<i>Figura 90. Desarrollo económico. Distribución discreta.....</i>	<i>368</i>
<i>Figura 91. Geomorfología. Distribución discreta.....</i>	<i>368</i>
<i>Figura 92. Impacto visual. Distribución discreta.....</i>	<i>369</i>
<i>Figura 93. Accesibilidad a la red de transporte. Distribución discreta.....</i>	<i>369</i>
<i>Figura 94. Ejemplo de las operaciones de recogida de biomasa a “pie de campo”.....</i>	<i>373</i>



Tabla 1. Distribución de fuentes energéticas utilizadas en la Comunidad Valenciana ..	31
Tabla 2. Potencial de Energías Renovables en la Comunidad Valenciana.....	31
Tabla 3. Información de las comarcas de las provincias de estudio (superficie en km <sup>2</sup> y densidad de población en hab./km <sup>2</sup> ).....	53
Tabla 4. Población, Superficie y densidad de los municipios de Utiel - Requena .....	53
Tabla 5. Clasificación de los costes fijos y costes variables .....	70
Tabla 6. Descripción de la unidad de transporte (UT), en la recogida de la biomasa ...	72
Tabla 7. Repercusión en el costes de transporte del personal y del combustible .....	72
Tabla 8. Consideraciones para obtener la Función de Coste sin compactación .....	72
Tabla 9. Consideraciones para obtener la Función de Coste con compactación .....	73
Tabla 10. Estructuración en tabla del método simplex .....	87
Tabla 11. Esquema en la localización de instalaciones. Fuentes: (Daskin 1995) .....	102
Tabla 12. Escala de valores para comparación por pares.....	135
Tabla 13. Principales métodos de normalización. Fuente: Barba-Romero, 1997 .....	145
Tabla 14. Factores y limitantes considerados para ubicar una planta de biomasa.....	177
Tabla 15. Valores del RI para la obtención del Ratio de Consistencia según el número de criterios. Fuente: Malczewski (1990) .....	178
Tabla 16. Escala en el método de comparación por pares, Malczewski (1999).....	179
Tabla 17. Análisis de adecuación de la comarca de Utiel-Requena para la localización de una planta de biomasa.....	180
Tabla 18. Matriz de comparación por pares de los factores del primer nivel.....	179
Tabla 19. Matriz de comparación por pares de los criterios (factores del nivel 2) asignados para la adecuación del territorio frente a una instalación de biomasa. ....	180
Tabla 20. Limitantes considerados para la localización de la planta de biomasa.....	181
Tabla 21. Superficies susceptibles para albergar una planta según su nivel de adecuación .....	188
Tabla 22. Superficies susceptibles para albergar una planta según su nivel de adecuación .....	188
Tabla 23. Selección y comparativa de las cinco mejores y peores valoraciones .....	191
Tabla 24. Características de los criterios implicados en el análisis .....	193
Tabla 25. Resultados numérico más relevantes a partir del método E-Fast .....	195
Tabla 26. Resultados numéricos más relevantes a partir del método Sobol' .....	197
Tabla 27. Resultados numéricos del análisis a partir del método E-FAST agrupado ..	198
Tabla 28. Resultados numéricos del análisis a partir del método Morris.....	199
Tabla 29. Función objetivo y variables del problema p-mediano .....	204
Tabla 30. Resultados de las cinco mejores ubicaciones según el p-mediano.....	205
Tabla 31. Resultados en la gestión de la biomasa a "pie de campo" .....	373
Tabla 32. Valores estadísticos obtenidos para dos centros de transferencia.....	209
Tabla 33. Principales resultados instalando centros de transferencia .....	212
Tabla 34. Principales resultados de trasladar la biomasa desde los centros de transferencia compactada a la planta (ubicación óptima).....	213
Tabla 35. Costes totales instalando centros de transf. con biomasa compactada .....	213
Tabla 36. Costes globales instalando centros de transf. a granel con p-mediano .....	216
Tabla 37. Función objetivo y variables del problema p-mediano .....	217
Tabla 38. Resultados principales de las cinco mejores ubicaciones.....	218
Tabla 39. Resultados del modelo de máxima cobertura dependiendo del número de centros de transferencia establecidos (distancias en Km.).....	220
Tabla 40. Costes globales instalado centros de transferencia a partir del problema de máxima cobertura (calculado en Km.).....	221

Tabla 41. Resultados de las cinco mejores ubicaciones empleando la matriz O-D.....	223
Tabla 42. Resultados de las cinco peores ubicaciones empleando la matriz O-D.....	223
Tabla 43. Comparación de las distancias resultantes de los modelos aplicados.....	226
Tabla 44. Comparación de los costes (en euros) resultantes de los modelos aplicados.....	228
Tabla 45. Ejemplo de la base de datos asociada a la cartografía.....	281
Tabla 46. Coeficientes residuales para cada especie agrícola.....	282
Tabla 47. Superficie ocupada por cada especie agrícola (ha) por provincia.....	283
Tabla 48. Relación de usos empleados en el Mapa de cultivos.....	285
Tabla 49. Coeficientes de disponibilidad por cada especie agrícola.....	286
Tabla 50. Biomasa comarcal agrícola por cultivos (Valencia).....	287
Tabla 51. Biomasa comarcal agrícola por cultivos (Lugo).....	288
Tabla 52. Biomasa comarcal agrícola por cultivos (Ciudad Real).....	288
Tabla 53. Valores genéricos de la caracterización de la biomasa agrícola.....	288
Tabla 54. Biomasa forestal disponible en cada provincia y por especie.....	293
Tabla 55. Biomasa forestal disponible en cada comarca y por especie (Valencia).....	294
Tabla 56. Biomasa forestal disponible en cada comarca y por especie (Lugo).....	294
Tabla 57. Biomasa forestal disponible en cada comarca y por especie (C. Real).....	295
Tabla 58. Volumen Con Corteza para cada especie a partir del estrato, Valencia.....	295
Tabla 59. Número de Pies para cada especie a partir del estrato en Valencia.....	296
Tabla 60. Volumen Con Corteza para cada especie a partir del estrato, Lugo.....	296
Tabla 61. Número de Pies para cada especie a partir del estrato en Lugo.....	297
Tabla 62. Volumen Con Corteza para cada especie a partir del estrato en C. Real.....	297
Tabla 63. Número de Pies para cada especie a partir del estrato, Ciudad Real.....	298
Tabla 64. Coeficientes respecto al VCC y al NP aplicados en las tres provincias.....	298
Tabla 65. Restricciones a aplicar para la ubicación de una central de bioenergía.....	299
Tabla 66. Matriz de comparación por pares: Pendiente del terreno.....	335
Tabla 67. Matriz de comparación por pares: Litología.....	337
Tabla 68. Clasificación general de la litología.....	339
Tabla 69. Matriz de comparación por pares: Tipos de cultivos.....	339
Tabla 70. Matriz de comparación: Cobertura Vegeta.....	341
Tabla 71. Matriz de comparación por pares: Accesibilidad a la Red vial.....	343
Tabla 72. Matriz de comparación por pares: unidades homogéneas del relieve.....	345
Tabla 73. Matriz de comparación por pares: Recursos biomásicos disponibles.....	347
Tabla 74. Matriz de comparación por pares: Desarrollo económico.....	349
Tabla 75. Matriz de comparación por pares: Demanda potencial local.....	351
Tabla 76. Matriz de comparación por pares: Población afectada.....	353
Tabla 77. Matriz de comparación: Coste de transporte.....	355
Tabla 78. Matriz de comparación por pares: Geomorfología.....	357
Tabla 79. Matriz de comparación por pares: Impacto visual.....	359

---

## **CAPÍTULO 1.**

### **PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN**

---

*En este primer capítulo se presenta el núcleo de la investigación cuyo contexto es el aprovechamiento de la biomasa como una fuente de energía renovable capaz de contribuir en el desarrollo sostenible de un territorio. Es por ello, que en este estudio se exponen diferentes herramientas y técnicas que puedan dar respuesta a conceptos tan importantes como la planificación energética de un territorio. La integración y utilización de los Sistemas de Información Geográfica, la Evaluación Multicriterio y los Modelos de localización en la optimización logística de la biomasa, es la idea principal a desarrollar, siendo los tres bloques estructurales de la investigación*



## RESUMEN

La necesidad de fomentar el desarrollo de energías renovables forma parte de una estrategia política y comunitaria que debe tener en cuenta las materias relacionadas con el medio ambiente, crecimiento, competitividad y empleo, competencia, investigación, desarrollo tecnológico y demostración, así como en el ámbito de la política agraria y de desarrollo rural. Es por ello que, en las últimas décadas, se empezó a dar un papel importante a estas energías como alternativa energética a las fuentes tradicionales, poniendo latente la necesidad de la búsqueda de nuevas herramientas y técnicas que puedan dar respuesta a conceptos tan importantes como la planificación energética de un territorio. De este modo, se comenzó un proceso de integración de las energías renovables mediante diversas actuaciones políticas a nivel mundial (Protocolo de Kyoto), siendo necesario además llevar a cabo iniciativas energéticas locales.

En este contexto, la utilización de la biomasa con fines energéticos ofrece múltiples ventajas con respecto a las fuentes de energía convencionales, así como en relación con otras fuentes de energía renovables, en particular unos costes relativamente bajos, una menor dependencia de las alteraciones climáticas a corto plazo, el fomento de las estructuras económicas regionales y la creación de fuentes de ingresos alternativas. Entre los principales beneficios destacaríamos reducir la dependencia de los combustibles fósiles, disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero y estimular la actividad económica en zonas rurales (Comisión de las Comunidades Europeas 2005).

En este trabajo se presentan diferentes metodologías y estrategias para impulsar el desarrollo del aprovechamiento de la biomasa procedente de residuos agrícolas y forestales, incluyendo los distintos y numerosos elementos implicados en la utilización de la biomasa como fuente energética: recursos disponibles y tipología, logística para su recogida y distribución, restricciones medioambientales y sociales, transporte, almacenamiento, costes, pre-tratamientos, demanda potencial, etc.

En este sentido, el estudio se centra en conocer la viabilidad económica, social y medioambiental, desarrollando y aplicando estrategias logísticas que permitan la identificación y cuantificación de la biomasa generada en un territorio, así como la localización óptima de una planta de biomasa y centros de transferencia, utilizando como herramienta fundamental los Sistemas de Información Geográfica (SIG) desde tres perspectivas diferentes. En el primer caso, se desarrolla y se presenta una metodología integral para optimizar el aprovechamiento energético de los recursos biomásicos enmarcada en un proyecto nacional ("BIODER"). En la segunda aplicación metodológica se hace uso de las técnicas de evaluación multicriterio en entornos SIG, determinando las zonas aptas para la instalación de dichas plantas en una zona de estudio. Posteriormente, y una vez obtenidos los resultados, se lleva a cabo un análisis de sensibilidad de las variables con el fin de comprobar la robustez del modelo planteado y la imprecisión de cada factor de entrada mediante el empleo de métodos globales. Finalmente, la aplicación de determinados modelos de localización basados en programación lineal implementados en un SIG, optimizan dicha ubicación, a la vez que se describen las estrategias logísticas y los costes de estos residuos.



## ABSTRACT

The need to promote renewable energy development is part of strategy and community policy which should take into account issues related to the environment, growth, competitiveness and employment, competition, technological development and demonstration, as well as in the field agricultural policy and rural development. This is the reason why, in recent decades, began to take an important role at these energies as an energy alternative against traditional sources, highlighting the need for finding new tools and techniques that can respond to important concepts such as the energy planning. As a result, was begun a integration process of renewable energy through different global policies (Kyoto Protocol), being also necessary to perform regional energy initiatives.

In this context, the use of biomass for energy offers many advantages over conventional energy sources, as well as in relation to other renewable energy sources, in particular, relatively low costs, less dependence on weather changes short term, the promotion of regional economic structures and the creation of alternative sources of income. Among the main benefits would emphasize reducing dependence on fossil fuels, reducing emissions of greenhouse gases and stimulate economic activity in rural areas (Commission of the European Communities 2005).

In this work different methodologies and strategies to promote the development of the use of biomass from agricultural and forestry residues, including the diverse and numerous elements involved in the use of biomass as an energy source: type resources, logistics for collection and distribution, environmental and social restrictions, transportation, storage, costs, pre-treatments, potential demand, etc.

In this sense, the study is focus on to know the economic, social and environmental viability, by means of the development and implementation of logistics strategies that allow the identification and quantification of biomass produced in a territory. In addition, the optimal location of a biomass plant and transfer facilities, using a Geographic Information Systems (GIS) environment from three different perspectives are presented. In the first case, a comprehensive methodology to optimize the energy use of biomass resources framed in a national project ("BIODER") has been developed and presented. The second methodological application uses multicriteria techniques in GIS environments, with the purpose of identifying areas suitable for the installation of such plants in an area of study. Subsequently, after obtaining the results, a sensitivity analysis of variables to test the robustness of the proposed model and the uncertainty of each input factor by using standard methods has been carried out. Finally, application of certain location models based on linear programming implemented in a GIS, optimize that location, while describing the logistics strategy and the biomass global costs.





## RESUM

La necessitat de fomentar el desenvolupament d'energies renovables forma part d'una estratègia política i comunitària que ha de tenir en compte les matèries relacionades amb el medi ambient, creixement, competitivitat i ocupació, competència, investigació, desenvolupament tecnològic i demostració, així com en l'àmbit de la política agrària i de desenvolupament rural. És per això que, en les últimes dècades, es va començar a donar un paper important a aquestes energies com a alternativa energètica a les fonts tradicionals, posant latent la necessitat de la recerca de noves eines i tècniques que puguin donar resposta a conceptes tan importants com la planificació energètica d'un territori. D'aquesta manera, es va començar un procés d'integració de les energies renovables mitjançant diverses actuacions polítiques a nivell mundial (Protocol de Kyoto), i és necessari també dur a terme iniciatives energètiques locals.

En aquest context, la utilització de la biomassa amb finalitats energètiques ofereix múltiples avantatges respecte a les fonts d'energia convencionals, així com en relació amb altres fonts d'energia renovables, en particular uns costos relativament baixos, una menor dependència de les alteracions climàtiques a curt termini, el foment de les estructures econòmiques regionals i la creació de fonts d'ingressos alternatives. Entre els principals beneficis destacariem reduir la dependència dels combustibles fòssils, disminuir les emissions de gasos d'efecte hivernacle i estimular l'activitat econòmica en zones rurals (Comissió de les Comunitats Europees 2005).

En aquest treball es presenten diferents metodologies i estratègies per impulsar el desenvolupament de l'aprofitament de la biomassa procedent de residus agrícoles i forestals, incloent els diferents i nombrosos elements implicats en la utilització de la biomassa com a font energètica: recursos disponibles i tipologia, logística per a la seva recollida i distribució, restriccions mediambientals i socials, transport, emmagatzematge, costos, pre-tractaments, demanda potencial, etc.

En aquest sentit, l'estudi es centra en conèixer la viabilitat econòmica, social i mediambiental, desenvolupant i aplicant estratègies logístiques que permetin la identificació i quantificació de la biomassa generada en un territori, així com la localització òptima d'una planta de biomassa i centres de transferència, utilitzant com a eina fonamental els Sistemes d'Informació Geogràfica (SIG) des de tres perspectives diferents. En el primer cas, es desenvolupa i es presenta una metodologia integral per optimitzar l'aprofitament energètic dels recursos biomàssics emmarcada en un projecte nacional ("BIODER"). En la segona aplicació metodològica es fa ús de les tècniques d'avaluació multicriteri en entorns SIG, determinant les zones aptes per a la instal·lació d'aquestes plantes en una zona d'estudi. Posteriorment, i un cop obtinguts els resultats, es porta a terme una anàlisi de sensibilitat de les variables per tal de comprovar la robustesa del model plantejat i la imprecisió de cada factor d'entrada mitjançant la utilització de mètodes globals. Finalment, l'aplicació de determinats models de localització basats en programació lineal implementats en un SIG, optimitzen la ubicació, al mateix temps que es descriuen les estratègies logístiques i els costos d'aquests residus.



**1.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN**

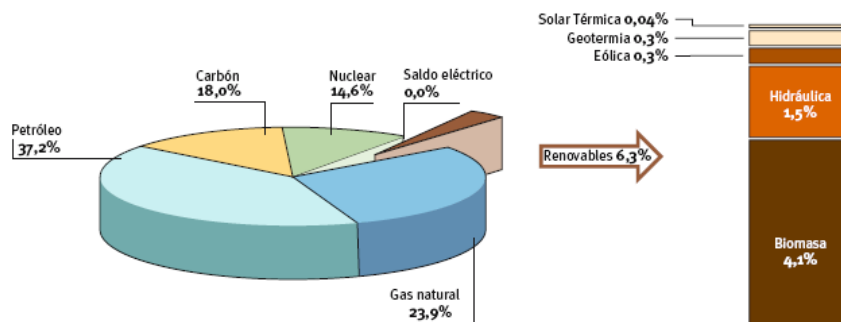
**1.1.1. Políticas de fomento de las energías renovables: Marco Europeo**

Desde hace unas décadas se comenzó a dar un papel importante a las energías renovables como alternativa energética a las procedentes de los recursos petrolíferos. La tendencia en el uso de estas nuevas energías fue aumentando, debido a la idea del respeto al medio ambiente, energías limpias, eficientes y la gran demanda social. Por todo ello, se comenzó un proceso de integración de las Energías Renovables, además de actuaciones políticas a nivel mundial establecidas en el Protocolo de Kyoto (Naciones Unidas 1998).

El libro Blanco de las Energías Renovables publicado por la Comisión Europea en Noviembre de 1997 (Comisión Europea 1997) es el documento base en la política de apoyo de las energías renovables en la Unión Europea, cuyo principal objetivo era alcanzar la cifra del 12% del total de la demanda energética en el año 2010 mediante la utilización de fuentes de energía renovables, objetivo que se ha elevado al 20% para el año 2020, con el intento añadido, de conseguir un número suficiente de países implicados, de llevarlo hasta el 30%.

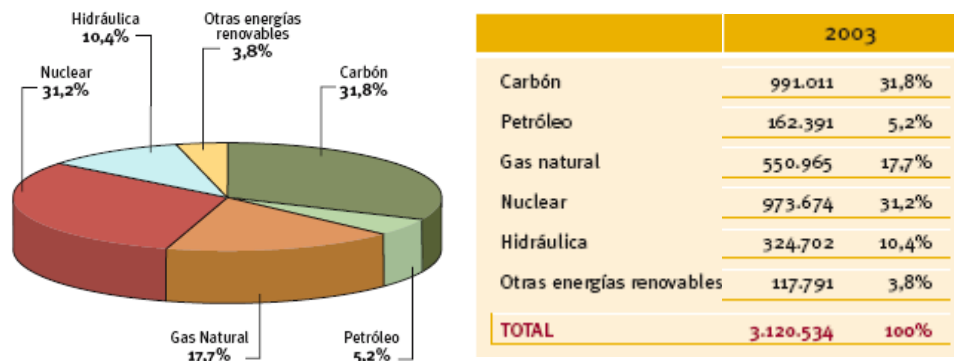
La necesidad de fomentar el desarrollo de energías renovables forma parte de una estrategia política y comunitaria que debe tener en cuenta las materias relacionadas con el medio ambiente, crecimiento, competitividad y empleo, competencia, investigación, desarrollo tecnológico y demostración, así como en el ámbito de la política agraria y de desarrollo rural. Especial referencia merece, el fenómeno denominado Cambio Climático, existiendo una iniciativa específica denominada Programa Europeo sobre el Cambio Climático, en el cual se destaca el uso de biocombustibles en el transporte para minimizar la emisión de gases nocivos que pueden ser los responsables de dicho cambio climático.

En el año 2002, la Unión Europea presenta el Libro Verde *Hacia una estrategia europea de seguridad del abastecimiento energético* (Comisión Europea 2002), proponiéndose una estrategia a largo plazo donde se reconoce a las energías renovables como la única fuente de energía en la Unión Europea que aporta un margen de maniobra para aumentar la oferta. De este modo, con el objetivo de impulsar el desarrollo de estas energías, se pretenden promover otras posibles iniciativas más novedosas. En la actualidad, el peso de las energías renovables se encuentra en un 6%, repartidas como muestra la Figura 1.



**Figura 1. Consumo de la energía primaria en la Unión Europea-25, 2004**

En Septiembre de 2001 fue aprobada la Directiva 2001/77/CE relativa a la promoción de la electricidad generada a partir de fuentes de energía renovables. El objetivo de la directiva europea es doble, por un lado deben fomentar el aumento de la contribución de las fuentes de energías renovables a la generación de electricidad, y por otro establecer las bases de un futuro marco comunitario de apoyo a las energías renovables.



**Figura 2. Estructura de generación eléctrica en la Unión Europea-25, 2003.**  
Fuente: Eurostat

Así mismo, la propia Directiva definía unos valores de referencia para el año 2010, donde situaba a la Unión Europea con un porcentaje del 22%, y a España, del 29.4% (anteriormente establecido por el Plan de Fomento de las Energías Renovables, 1999) respecto al consumo de electricidad generada partir de fuentes renovables. La figura 3 muestra la generación de electricidad de la Unión Europea en el año 2003, donde se puede observar que un elevado porcentaje de la energía generada no es de origen renovable.

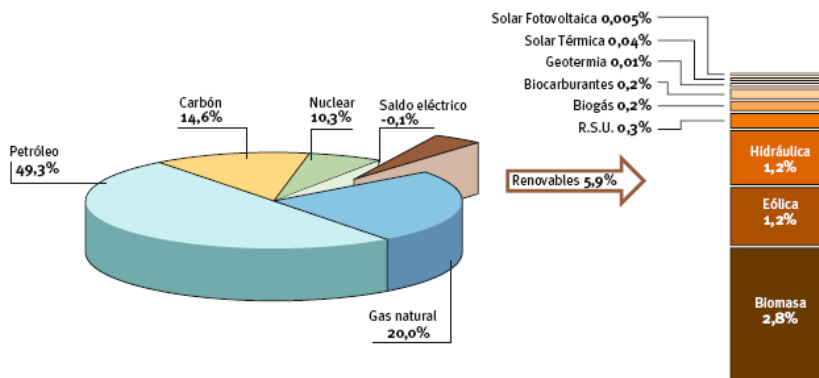
Indudablemente, las energías renovables, al igual que la mejora de la eficiencia energética, son factores claves para el cumplimiento de los objetivos fijados por el Protocolo de Kyoto, así como de otras muchas estrategias políticas en el ámbito de energías renovables, tal y como se reconoce en la *Estrategia de la unión Europea para un desarrollo sostenible* (Comisión de las Comunidades Europeas 2001) para garantizar la sostenibilidad del modelo de desarrollo sostenible.

Desde el año 2007, la Unión Europea está llevando el llamado “paquete verde” que lleva como objetivo cumplir el compromiso 20/20/20. Este compromiso se refiere a un triple objetivo para el año 2020 por el cual se debe conseguir que el 20% del consumo de energía final provenga de fuentes renovables, que se reduzcan las emisiones de gases de efecto invernadero en un 20% (con respecto a las de 1990) y que se produzca una mejora de la eficiencia energética del 20% respecto al consumo tendencial (Comisión Nacional de la Energía 2009)

1.1.2. *Políticas de fomento de las energías renovables: Marco Nacional*

La aprobación, el pasado 26 de Agosto de 2005, del Plan de las Energías Renovables (Ministerio de Industria 2005) actualiza los contenidos del Plan de Fomento de las Energías Renovables, vigente desde diciembre de 1999, manteniendo una estrategia encaminada a lograr para el 2010, el 12% de la energía primaria proveniente de energías renovables, de acuerdo con los objetivos de la Unión Europea.

El Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), adscrito al Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, es el encargado de realizar el seguimiento, en materia energética, elaborando memorias anuales y analizando la situación de las energías renovables en España. El balance realizado por dicho organismo indicaba que el consumo global de energías renovables ha aumentado en España significativamente hasta alcanzar actualmente un 6% de la energía primaria, tal y como muestra la figura 5, pero de una manera insuficiente para alcanzar el objetivo fijado para 2010.



**Figura 3. Consumo de la energía primaria por fuentes en España, 2005.**  
Fuente: Ministerio de Industria, Turismo y Comercio

En ese momento, la energía eólica, los biocarburantes y el biogás, seguían el proceso evolutivo de una manera satisfactoria, no tanto la minihidráulica y el área de la biomasa y la energía solar que se desarrollaban por debajo del ritmo necesario para alcanzar los objetivos. Por otro lado, el consumo de energía primaria crecía muy por encima de lo previsto debido a la elevada demanda eléctrica y el consumo de carburantes en el transporte.

La baja probabilidad de alcanzar el objetivo de situar a España en el 12% de producción de energía mediante fuentes de energías renovables y otras razones adicionales, provocó la revisión y cambios en determinados aspectos energéticos. De este modo, se elaboró el “Plan de Acción 2005-2007” (Ministerio de Industria y Comercio 2005), que plantea las líneas prioritarias de actuación para el lanzamiento de las medidas contempladas en la Estrategia de Ahorro y Eficiencia de la Energía en España 2004-2012.

Tras la aprobación del Plan de Fomento fueron establecidos diversos objetivos que hacían referencia al uso de las fuentes de energías renovables para la generación de la

electricidad y al consumo de los biocarburantes. En esta línea, se contempla una serie de actuaciones, por parte de los estados miembros y la Comisión Europea, para promocionar esta forma de producción de energía en el mercado interior. Así mismo, los objetivos nacionales que se indicaron para 2010 suponían que la electricidad generada por estas fuentes renovables alcanzará el 29.4% del consumo nacional bruto de electricidad. En lo relativo al uso de los biocarburantes para el transporte establece 2% calculado a partir de la base del contenido energético (gasolina y gasóleo) para finales del 2005, y el 5.75% a finales de 2010.

Además, las energías renovables tienen como una de sus principales ventajas el respeto al medioambiente, con lo que se pueden considerar firmes candidatas para cumplir con los nuevos compromisos de carácter medioambiental, a nivel mundial siguiendo el Protocolo de Kyoto, y a nivel estatal, mediante El Plan Nacional de Asignación de Derechos de Emisión (PNA) (Ministerio de Industria y Comercio 2006). Este PNA se aprueba con el objetivo de disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> que no quedan cubiertas en las Directivas Europeas y Nacionales.

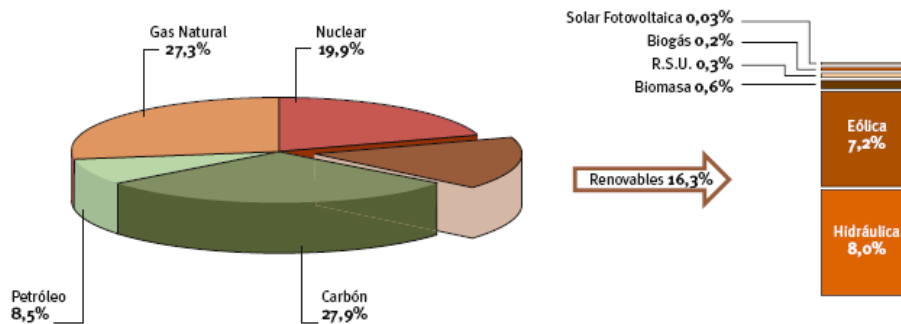


Figura 4. Estructura de la generación eléctrica en España, 2005.  
Fuente: Ministerio de Industria, Turismo y Comercio

Haciendo un resumen de los puntos que se han tratado, se pretende que para la elaboración del PER 2005-2010, se refuerce la coordinación en los tres ámbitos de planificación: Energías Renovables, eficiencia energética y lucha contra el cambio climático. Con todo ello, se busca la máxima eficacia y coherencia de objetivos manteniendo los compromisos previamente adquiridos.

### 1.1.3. Situación energética: Marco Mediterráneo (Comunidad Valenciana)

En los últimos años, la Comunidad Valenciana ha experimentando aumentos significativos de los consumos de la energía motivados por el continuo crecimiento de nuestra economía y el aumento de la calidad de vida. En el año 2008, la Comunidad Valenciana situaba en un **3,2% el porcentaje de energía primaria de origen renovable**, por lo que sería necesario prácticamente duplicar su uso para alcanzar la media nacional (6.7%), y aumentarlo hasta cuatro veces más para lograr el objetivo europeo (12%).

La Comunidad Valenciana posee un elevado potencial para el aprovechamiento energético de biomasa basado en una intensa actividad de los sectores agrícola, agroalimentario y de madera y mueble. Estos residuos presentan el inconveniente de una moderada dispersión geográfica para su recogida y transporte, y un elevado contenido en cenizas y componentes potencialmente corrosivos en algunas variedades. Se estima que el porcentaje de energía primaria cubierto con renovables se podría, al menos, duplicarse utilizando este recurso.

Se ha analizado la situación actual de la biomasa y otras energías renovables a nivel europeo, nacional y regional, haciendo una revisión de las empresas de la comunidad valenciana que se dedican relacionadas con la biomasa y aplicaciones energéticas. En la actualidad, los porcentajes de energía primaria consumida de origen renovable para Europa, España y la Comunidad Valenciana están incluidos en la siguiente tabla, que las compara con las otras fuentes posibles:

	<b>CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA (Mtep<sup>1</sup>)</b>					
	<b>U.E (2005)</b>		<b>ESPAÑA (2007)</b>		<b>C.V. (2007)</b>	
	Carbón	217,64	14,1%	20,24	13,7%	0,00
Petróleo	599,53	38,8%	70,85	48,1%	5,46	44,9%
Gas Natural	386,56	25%	31,60	21,5%	3,44	28,4%
Nuclear	232,37	15,1%	14,36	9,8%	1,63	13,4%
Saldo Eléctrico	4,91	0,3%	-0,50	-	1,27	10,4%
Renovables	102,38	6,6%	10,23	6,9%	0,35	2,9%
Consumo total*	1.543,39	100%	146,78	100%	12,14	100%

Tabla 1. Distribución de fuentes energéticas utilizadas en la Comunidad Valenciana

TIPO DE USO	SITUACIÓN 1988		OBJETIVOS PROPUESTOS 1998-2010		RESULTADOS FINALES 2010	
	MW	EP (tep)	MW	EP (tep)	MW	EP (tep)
USOS TÉRMICOS:						
Energía de la biomasa		183.121		39.757		! 222.878
Energía solar térmica		2.472		15.440		17.912
USOS ELÉCTRICOS:						
Eólica	0	0,2	2.300	474.740	2.300	474.740
Hidráulica	649	81.612	94	26.660	743	108.272
Energía de la biomasa	0	0	20	51.600	20	51.600
Valoración de RSU	0	0	10	22.933	10	22.933
Energía solar fotovoltaica	0,6	84	13	1.986	14	2.070

Tabla 2. Potencial de Energías Renovables en la Comunidad Valenciana

<sup>1</sup> 1 tep = 41,855 GJ = 11,628 MWh = 1 000 m3 de gas = 7,33 barriles de petróleo

Por ello, desde hace unos años se han puesto en marcha diversas actuaciones políticas para hacer que estos objetivos sean posibles de alcanzar. El Plan de Ahorro y Eficiencia Energética de la Comunidad Valenciana realiza una propuesta clara con actuaciones dirigidas a obtener una mayor eficiencia y diversificación energética, fomento de las energías renovables y un uso racional de la energía en la Comunidad Valenciana (parte de las cuales ya están siendo desarrolladas por la Agencia Valenciana de la Energía). Todas estas actuaciones permitirán a las sociedades modernas un continuo crecimiento económico, a la vez que son competitivas y respetan el medio ambiente.

La Agencia Valenciana de la Energía (AVEN) tiene entre su plan de medidas, el impulso de las energías renovables, mediante subvenciones a la utilización de fuentes renovables de energía en la industria, en especial la biomasa y nuevos usos de la biomasa, sumado a estas acciones que está desarrollando la Agencia Valenciana de la Energía, se unen las propuestas en el Plan de Ahorro y Eficiencia Energética de la Comunidad Valenciana como el de fomentar, por parte de los órganos competentes en agricultura y medio ambiente, el aprovechamiento de la biomasa forestal y agrícola para la generación de calor y electricidad (Conselleria d'Industria comerç i energia).

#### ***1.1.4. Proyectos de investigación precedentes realizados en el Instituto de Ingeniería Energética referidos a la integración de la biomasa como fuente energética***

El Instituto de Ingeniería Energética (IIE) es un centro de investigación integrado en la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), cuyo principal campo y línea de investigación es el de la Energía, realizando estudios de evaluación y prospectiva en dicha materia. La presente tesis doctoral se ha desarrollado en el marco de una de las áreas denominada Energías Renovables y Sistemas Avanzados la cual se centra en la realización de estudios de sistemas de energías renovables y de eficiencia energética, destacando las siguientes subáreas: 1) Biomasa: Evaluación y caracterización de recursos de biomasa, 2) Sistemas avanzados de combustión y gasificación, 3) Aplicaciones de Cogeneración en el sector comercial, residencial e industrial, y 4) Integración de recursos energéticos distribuidos.

En el año 2004 se comenzó a fraguar a nivel europeo el que sería el proyecto “The birth of a european distributed energy partenership that will help the large scale implementation of distributed energy resources in Europe” financiado por la Comisión de las Comunidades Europeas dentro del VII Proyecto Europeo Programa Marco, cuyo objetivo era la integración de las energías renovables y cogeneración en el sistema energético, mediante la potenciación de los recursos energéticos distribuidos (DER) como las energías renovables, cogeneración y sistemas de almacenamiento de energía. Este proyecto consideraba la biomasa como uno de dichos recursos DER y analiza las aplicaciones térmicas y eléctricas en grupos de clientes del sector público y privado (Hoteles, hospitales, industrias, etc.).

Posteriormente, a nivel regional fue concedido por el IMPIVA (Instituto de la mediana y pequeña industria valenciana) en 2005 el proyecto “*BIOVAL. Optimización del aprovechamiento energético de los recursos biomásicos en la Comunidad Valenciana*”. El objetivo principal de este proyecto era impulsar y promocionar el uso energético de



biomasa en la Comunidad Valenciana, de acuerdo con las directrices europeas, con el fin de incrementar la participación de energías renovables en la región. Este proyecto sirvió para introducir a la presente autora en el ámbito de la biomasa desde su punto de vista logístico, en cuyo marco y durante la realización del mismo fue abordado el proyecto de investigación *“Metodología basada en Sistemas de Información Geográfica para la optimización de la logística y el transporte en la ubicación de centrales de biomasa”* con la finalidad de obtener el Diploma de Estudios Avanzados (D.E.A). A partir de este punto, las diferentes técnicas cartográficas tales como los Sistemas de Información Geográfica cobran un papel importante en éste y en los sucesivos proyectos, considerándola como herramientas fundamentales para su desarrollo y aplicación.

En el año 2006 fue concedido por el Ministerio de Ciencia e Innovación el proyecto de investigación *“BIODER. Segmentación de la demanda y estudio del potencial de la biomasa como recurso energético distribuido renovable para aplicaciones térmicas, cogeneración y biocombustibles”*, a partir del cual la presente autora se inmiscuyó plenamente en las estrategias logísticas de la biomasa y en la teoría de la localización de plantas continuando con la experiencia dada por el anterior proyecto, con la finalidad de alcanzar un alto conocimiento en estas materias cuya aplicación directa presenta como tesis doctoral. El objetivo de BIODER fue definir una metodología general para el aprovechamiento energético de la biomasa a nivel nacional, avanzando en el estudio de las variables que intervienen en el aprovechamiento energético de biomasa agrícola y forestal, y asignar según las posibles propiedades y cantidad anual de biomasa gestionada cual es la mejor alternativa desde el punto de vista técnico-económico y ambiental.

Otros estudios y proyectos a nivel europeo, nacional y regional en esta área continúan actualmente vigentes. Es el caso del proyecto *“PROBIOGAS. Desarrollo de sistemas sostenibles de producción y uso de biogás agroindustrial en España”*, cuyo principal objetivo es el desarrollo de sistemas de producción y uso de biogás en entornos agroindustriales sostenibles, así como la demostración de su viabilidad y promoción en España”. Además, podemos destacar un estudio relevante de prospectiva energética en 2009 solicitado por la Conselleria de Medi Ambient, Aigua, Urbanisme i Habitatge, constituido por un gran número de instituciones y organismos, tanto públicos como privados, dentro de la ambiciosa propuesta presentada por la Generalitat Valenciana *“Estrategia Territorial de la Comunidad Valenciana”*. Hemos de resaltar que la cartografía en este tipo de estudios territoriales juega un papel de importante transcendencia.

#### ***1.1.5. Introducción y objetivos del proyecto “BIODER: Segmentación de la demanda y estudio del potencial de la biomasa como recurso energético distribuido renovable para aplicaciones térmicas, cogeneración y biocombustibles”***

Existen grandes cantidades de residuos disponibles procedentes de la producción agrícola y la industria agroalimentaria, que pueden ser cuantificados para la obtención de energía. La utilización de residuos biomásicos en sustitución de los combustibles fósiles

tiene además una ventaja importante dado que la combustión de biomasa genera un balance neutro en cuanto a la aportación de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

La rápida difusión de aplicaciones basadas en biomasa plantea el proyecto BIODER como un objetivo global para el desarrollo de una metodología general con el fin de evaluar los recursos de biomasa en un área de estudio, desarrollar estrategias logísticas adecuadas para que la gestión de este recurso sea sostenible y económicamente viable, transformar estos recursos en electricidad o combustible estandarizado y de calidad e identificar los potenciales consumidores potenciales de este biocombustible. En esta línea los objetivos específicos planteados por el proyecto fueron:

- Objetivo específico 1. Desarrollar una metodología para la Evaluación de los recursos de Biomasa, y su caracterización, con aplicación a un caso de estudio. La mayoría de las tareas realizadas han sido automatizadas mediante la misma aplicación cartográfica y complementada con una estructura Desktop - Grid para el análisis de redes (recogida y distribución de la biomasa residual).
- Objetivo específico 2. Desarrollar una metodología para optimizar la logística, ubicación y tipo del centro de transformación o transferencia para una zona de estudio genérica. Esta metodología considerará tanto la cantidad de recursos de biomasa y sus propiedades, las tecnologías y sistemas aplicables y la demanda.
- Objetivo específico 3. Segmentar la demanda energética en función de los usos finales de la energía e identificación de los segmentos con mayor potencial para aplicaciones térmicas y de cogeneración basadas en biocombustibles.
- Objetivo específico 4. Analizar las mejores tecnologías y sistemas disponibles en la actualidad y a corto plazo (<5 años) para el aprovechamiento energético de biomasa y asignar según las posibles propiedades y cantidad anual de biomasa gestionada cual es la mejor alternativa desde el punto de vista técnico-económico y ambiental. Simulación de las mejores tecnologías (MDT's) con el software especializado Chemcad.

Una parte de la presente tesis doctoral está enmarcada en los objetivos específicos 1 y 2. Tanto la metodología desarrollada, como los resultados y la cartografía temática derivada se describen y muestran en el Capítulo 5 y en el Anexo II.

## ***1.2. JUSTIFICACIÓN Y DEFINICIÓN DE OBJETIVOS***

Uno de los principales objetivos europeos desde ya hace varios años es elaborar y promover estrategias a largo plazo que permitan la integración de políticas de desarrollo sostenible desde el punto de vista económico, social y ecológico (Comisión de las Comunidades Europeas 2001). Destacamos, por la temática que nos ocupa, las acciones relacionadas con el eje energético cuyos dos objetivos principales e interconectados fueron: reducir las emisiones a la atmósfera de gases de efecto invernadero para limitar y controlar el cambio climático, y en segundo lugar incrementar el uso de energías limpias, conocidas como **Energías Renovables** (ver Anexo I para una breve introducción de las mismas).

Una de las áreas de este grupo de energías es la biomasa con fines energéticos. Un gran número de estudios a nivel regional, nacional e internacional evidencian la existencia de grandes cantidades de residuos biomásicos disponibles procedentes de la producción

agrícola, forestal y las industrias agroalimentarias, que pueden ser aprovechados con fines energéticos (en el apartado siguiente vemos una relación de estudios y ejemplos). Este hecho pone en relieve la necesidad de desarrollar metodologías para evaluar estos recursos en un territorio, al mismo tiempo que aplicar estrategias logísticas adecuadas para garantizar un desarrollo territorial sostenible y la viabilidad económica.

Son muchos los factores a considerar para localizar una instalación, ya sea deseable o no, tales como dónde se encuentra espacialmente el recurso, cuales son las infraestructuras existentes, cuales son las limitaciones ambientales, sociales, que actividades o usos se pueden beneficiar o cuales pueden resultar limitados, donde se encuentran los centros de consumo o demanda, cuales son los costes asociados, entre otros muchos aspectos.

Por lo tanto, se pone de relieve que la localización óptima de una planta de producción de energía, como es el caso de una planta de biomasa, no es una labor trivial como consecuencia del elevado número de variables que confluyen (geográficas, económicas, ambientales, sociales, políticas, etc.). Por este motivo, aunque existen metodologías o técnicas que responden al objetivo planteado, en muchas ocasiones puede ocurrir que computacionalmente no sean muy eficientes, o que el modelo sea poco realista, u otros motivos que fuercen la búsqueda de planteamientos alternativos. En el apartado siguiente veremos la diversidad de estudios que se han llevado a cabo para abordar problemas de localización de instalaciones y los resultados obtenidos.

Algunos estudios dirigen sus esfuerzos hacia el desarrollo de los DSS<sup>2</sup> (Decision Support System) para la toma de decisiones, otros son resueltos mediante la combinación de heurísticos planteando una función objetivo mediante programación lineal, otros emplean técnicas de evaluación multicriterio (EMC), y desde hace algunos años se han integrado los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para complementar las técnicas anteriores e incluso sumarse a las opciones existentes. Durante los últimos años, se ha puesto de manifiesto que la combinación de dichas técnicas resuelve y mejora planteamientos sobre todo en el campo de la planificación territorial, energética y ambiental (Arcila Garrido 2003; Bosque 2004; Domínguez Bravo 2003; Gómez 2005).

Es por ello que en este trabajo, el problema de la localización óptima de una planta de biomasa se aborda desde diferentes perspectivas: Sistemas de Información Geográfica, Evaluación Multicriterio en entornos SIG y modelos de localización formulados mediante programación lineal implementados en SIG.

En el primer caso, destacamos la importancia y la perfecta integración de los Sistemas de Información Geográfica como herramienta para fusionar el conocimiento geográfico y el ámbito energético referido a los recursos biomásicos, concretamente su distribución espacial, tipología, caracterización, producción energética y costes. Se parte del proyecto BIODER, descrito en el apartado anterior, donde la autora tuvo una participación importante desde el punto de vista de aplicación SIG, para extraer nuevos análisis y conclusiones vinculados al problema que nos ocupa, y que contribuyó a reforzar el

---

<sup>2</sup> Herramienta basada en sistemas de información geográfica, interactiva, flexible y adaptable, especialmente diseñada para dar solución a un complejo problema de gestión estratégica o planificación territorial y apoyar en la toma de decisiones

discurso de la importancia de los SIG en el ámbito energético, como se vislumbra en el presente trabajo.

Normalmente, para la localización de instalaciones el método de EMC mayormente utilizado es el procedimiento de las jerarquías analíticas de Saaty (ver apartado 4.4.2.1), a pesar de que esta técnica no está completamente integrada en un entorno SIG de una manera plenamente satisfactoria (Bosque 2004). La combinación de los Sistemas de Información Geográfica y los Métodos de Evaluación Multicriterio ofrecen un potencial que debe ser aprovechado para adaptar los muy diversos problemas que pueden ser planteados a este entorno y resolverlos satisfactoriamente. De modo que, este trabajo cubre el estudio del grado de adecuación de un territorio frente a la instalación de una planta de biomasa, desvelando la diversidad de factores que inciden en la logística y el transporte de la biomasa, respetando el entorno ambiental y socialmente.

Respecto a los modelos de localización-asignación combinados con SIG sí existen estudios, principalmente orientados a instalaciones deseables (hospitales, colegios, centros comerciales, etc.), las cuales han sido las más estudiadas por motivos sociales. En este sentido, la aportación de este trabajo en este ámbito es la aplicación de determinados modelos de localización (como el p-mediano o con coberturas) implementados en un SIG para optimizar la localización de una planta de biomasa.

Con el fin de analizar las relaciones entre un territorio y el aprovechamiento de la biomasa como recurso energético, poniendo de manifiesto la importancia de las herramientas de análisis geográfico, se plantea el siguiente **objetivo general**:

Aplicación de diferentes metodologías en entornos SIG para la evaluación y optimización logística de la biomasa de origen agrícola y forestal, así como para la localización de plantas de biomasa.

Para alcanzar este objetivo global a continuación se enuncian los siguientes **objetivos específicos**:

- Conocer el estado actual de las principales técnicas y estrategias logísticas en el ámbito de la biomasa y sus posibilidades de desarrollo, así como las principales aplicaciones de los sistemas de información geográfica en dicha área, destacando aquéllas referidas a EMC o modelos de localización.
- Evaluar, identificar y cuantificar los recursos de biomasa de origen agrícola y forestal para cada una de las comarcas de las tres provincias seleccionadas: Lugo, Ciudad Real y Valencia, en el marco del proyecto BIODER.
- Optimizar la logística y el transporte con el fin de evaluar los costes, las distancias y los tiempos empleados en transportar la biomasa desde su punto de origen a la planta (fase de recogida) y desde la planta a los potenciales consumidores (distribución), en el marco del proyecto BIODER.
- Analizar y aplicar las principales variables de origen ambiental, económico y social influyentes en la localización de una planta de biomasa, con la finalidad de conocer las zonas aptas de un territorio para albergar tal instalación, mediante técnicas de evaluación multicriterio.

- Analizar la sensibilidad de las variables para el caso de estudio planteado mediante métodos globales (Sobol y Fast) identificando aquellas que aportan más información a la EMC y robustez al modelo planteado.
- Analizar los modelos de localización de actividades o instalaciones basados en programación lineal para ser aplicados en el ámbito de la biomasa. El objetivo de optimizar las estrategias logísticas deriva en minimizar los costes de la biomasa e identificar la ubicación óptima de la planta y de los centros de transferencia.
- Elaborar los productos cartográficos derivados de los casos de estudio y metodologías planteadas, representando los resultados tanto gráfica (mapas temático) como estadísticamente.

### **1.3. ESTADO DEL ARTE**

Para el desarrollo de esta tesis doctoral ha resultado imprescindible consultar una amplia bibliografía que dotase a la investigación tanto de una base conceptual adecuada como del estado actual del conocimiento científico en los campos abordados. También ha sido necesario recurrir a la experiencia acumulada en el desarrollo de otros proyectos de investigación que aplicaban los sistemas de información geográfica en la optimización de la logística y el transporte dentro del área de la biomasa agrícola y forestal, así como la localización óptima de instalaciones, en nuestro caso concreto centrales de bioenergía. La revisión de la literatura hace posible conocer cuales son los avances en el campo en el que se va a desarrollar la investigación y aquellas disciplinas directamente relacionadas con el mismo (Chad 1996), aunque como es el caso que nos ocupa se extiende más allá de los límites del problema planteado a otras disciplinas que veremos en los sucesivos apartados.

A continuación se presentan las principales ideas y novedades obtenidas principalmente de artículos científico-técnicos y de estudios presentados en diferentes congresos de ámbito nacional como internacional, enmarcados todos ellos en el campo de la energía, del transporte, información geográfica y planificación territorial. Entre las revistas científicas indexadas podríamos citar *Applied Energy*, *Computers operations research*, *Energy Policy*, *Biomass and Bioenergy*, *European Journal of Operational Research*, *Renewable Energy*, *Location Science*, *Waste Management*, *Journal of Environmental Managemet*, *Journal of geographical information System*, entre otras y algunos congresos tales como el *16th European Biomass Conference & Exhibition* y el *IV y VIII Congreso de Ingeniería del Transporte*.

Los principales textos de referencia que han servido para documentar y ampliar el conocimiento en las distintas áreas que en este trabajo se abordan son los siguientes:

En el ámbito de la programación lineal destacamos por excelencia el libro “*Linear Programming*” (volumen I, 1997) escrito por George B. Dantzig, pionero en la teoría de la programación lineal, donde nos introduce en este campo mediante ejemplos, ideas, formulaciones para ilustrar y explicar, además, un gran número de problemas tales como el problema del transporte o del camino óptimo, desarrollando los métodos y algoritmos, de distinta naturaleza, más apropiados para su resolución.

En la línea de la programación lineal también destacamos el libro de Juan José Salazar titulado “*Programación Matemática*” (2001) cuyo autor lo utiliza como texto para impartir la asignatura en la licenciatura de matemáticas de la Universidad de La Laguna (Tenerife). En el libro se describen el campo de las matemáticas aplicadas orientado al diseño de metodologías para resolver problemas de optimización de recursos limitados. Para ello contiene capítulos destinados a la programación lineal entera, programación dinámica, teoría de grafos y optimización combinatoria.

Una aproximación clara y actualizada de los estudios de decisión territorial se plasma en el libro de Montserrat Gómez y José I. Barredo titulado *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la Ordenación del Territorio (2ª Edición, 2005)*. En esta obra se tratan los métodos de análisis y toma de decisiones en la EMC, incluyendo los procedimientos de evaluación de resultados a través del tratamiento del error y la incertidumbre así como análisis de sensibilidad. Se incluye además una serie de aplicaciones y ejemplos prácticos mediante la utilización de SIG raster o vectorial.

Otra obra de importancia considerable en el ámbito de los SIG y los análisis de localización es la presentada por Joaquín Bosque Sendra y Antonio Moreno, *Sistemas de Información Geográfica y localización de instalaciones y equipamientos (2004)*. Esta se encuentra dividida en tres bloques, donde en el primero se describe la teoría que envuelve un análisis de localización y los principales modelos matemáticos empleados para su resolución. En el segundo bloque se describe y se presenta el programa Localiza que resuelve los problemas de localización óptima. Y en el último bloque se incluye un amplio número de problemas concretos de localización de equipamientos tales como: escuelas, hospitales, vertederos de residuos sólidos urbanos, recogida de basura, etc.

Mark S. Daskin, en su libro “*Network and discrete location. Models, algorithms and applications*” (1995), intenta introducir al lector en los modelos de localización clásicos para posteriormente, y en base a ellos, describir un gran número de otro tipo de modelos más complicados y realistas. Además, a partir de la multitud de ejercicios y el planteamiento de metodologías que se van abordando, el lector consigue adquirir cierta habilidad para formular y resolver problemas de localización de instalaciones. Estas metodologías se refieren a: programación lineal, algoritmos grafo-teóricos, algoritmos heurísticos, relajaciones lagrangianas, métodos como el “Branch and bound”, algoritmos ascendientes o descomposiciones.

Uno de los predecesores en el análisis de decisión multicriterio espacial fue Malkcewsky (1999), donde en la década de los noventa comenzó a perfilar el marco en el cual hoy entendemos las técnicas de EMC basadas en GIS. En su obra describe un gran número de aspectos de la EMC-SIG como: los elementos que conforman estas técnicas, criterios, ponderación, las reglas de decisión, análisis de sensibilidad, los sistemas de toma de decisiones espaciales (SDSS) y casos prácticos. Algunos de los siguientes apartados teóricos se basan en dicho autor.

### ***1.3.1. Diferentes estrategias para la evaluación de la biomasa agrícola y forestal***

Una de las principales características de los recursos biomásicos es su heterogeneidad, la cual hace imposible abordar esta área desde una única perspectiva. Esta distribución espacial dificulta enormemente las tareas de recogida del residuo así como la logística y el transporte del mismo hasta las plantas de bioenergía, aumentando considerablemente los costes totales y siendo un obstáculo para su identificación y gestión. Esta heterogeneidad hace necesaria la identificación de cada tipo de recurso y sus peculiaridades (humedad, densidad, ceniza y materias volátiles), para poder afrontar los obstáculos que se generan de la misma. Respecto al tipo de recurso biomásico empleado son los residuos agrícolas y forestales los más utilizados, si bien existen proyectos puntuales en otros tipos como veremos a continuación.

Uno de los primeros trabajos que utilizaron un Sistema de Información Geográfica para la valoración de los recursos biomásicos fue el realizado por Noon y Daly (Noon 1996) con BRAVO (Biomass Resource Assessment Version One) como un Sistema de Toma de Decisiones (Decision Support System, DSS) en el sector de la biomasa como fuente energética. En este estudio se expone por primera vez la idea que los costes de transporte (recogida y distribución de la biomasa) son cruciales en la conversión de una planta de combustión de carbón en una de co-generación. Además, se introduce el término *Análisis de redes* para la determinación de distancias, haciendo uso de la red de transporte, aplicando herramientas SIG. En el artículo se describe un modelo de transporte donde se distinguen dos distancias. La primera en línea recta entre la localización de la biomasa y la red de transporte (al nodo más cercano), y la segunda, el camino más corto entre el nodo más cercano y cada una de las 12 plantas candidatas. Este modelo hace posible calcular el coste de transporte (por tonelada seca de biomasa) y la viabilidad económica para abastecer una planta, así como el área geográfica que cubrirá cada una de ellas, a partir de un círculo de radio específico en cuyo centro está ubicada cada planta.

En la Región de Navarra, Domínguez Bravo et al. (2003), evaluaron la biomasa potencial con fines energéticos tanto de origen agrícola como forestal de las predominantes especies de ambos tipos. Para ello, se basó en el poder calorífico (superior e inferior) de cada tipo de cultivo y de la localización de éstos a partir de la cartografía del Segundo Inventario Forestal Nacional. A partir del valor calculado para cada píxel de 1ha, se evalúa la biomasa potencial total a nivel municipal (MJ/ha). También vemos la valoración del potencial de biomasa, desde el punto de vista técnico y económico, en Sicilia por Marco Beccali et al. (2009). En este estudio se desarrolla una metodología global utilizando Sistemas de Información Geográfica y los datos espaciales para cada ámbito: agrícola, climáticos, económicos, orografía (modelos digitales del terreno), geológicos, litológicos y pluviométricos. La biomasa teórica agrícola es obtenida a partir de la aplicación de un coeficiente correspondiente a la región Mediterránea (en términos de biomasa por hectárea) y dependiendo del tipo de cultivo, alcanzándose la cifra de 1000 kt/año. De un modo similar, aunque cumpliendo con diferentes restricciones, la biomasa precedente de áreas forestales alcanza 1.322,3 kt/año para ser transformada en pellets. Además, se tienen en cuenta los cultivos energéticos con predominación de la Colza (típica especie del área Mediterránea), y éstos alcanzan un rendimiento de 300 t/km<sup>2</sup>, destinándose para fines energéticos alrededor de 170 kt.

Como veremos en el próximo apartado y en el capítulo 5 correspondiente a costes globales, éstos son obtenidos de la suma de las labores y operaciones del campo, recogida, transporte y producción de pelets, siendo el coste de transporte el más relevante. Los resultados en este estudio se ven reflejados a partir de las curvas de coste y abastecimiento para cada distrito y tipo de biomasa evaluada (€/t en función de las kt de biomasa potencial).

Otro estudio llevado a cabo en Punjab (India) se centra en determinar la biomasa producida a partir de un coeficiente residual para cada tipo de cultivo y las toneladas totales de la biomasa generada, conociendo previamente el área cultivada (Jagtar 2008). Concretamente, se describe un modelo para el cálculo de costes de transporte similar a descrito por Noon y Daly (Noon 1996) basado en el área encerrada por un círculo determinado. Se basa, principalmente, en calcular dicho coste a partir de la biomasa que se genera en un círculo de radio  $r$ , y teniendo en cuenta la capacidad de carga, la densidad de la biomasa, el coste de recogida y el coste unitario de transporte. Aplicando dicho modelo se concluye que los costes de recogida unitarios en campo decrecen con el crecimiento de la densidad espacial de la biomasa, mientras que la capacidad de carga no es un factor determinante. Años después los mismos autores (Jagtar 2010) continuaron con esta línea de investigación presentando un nuevo modelo matemático para el transporte de la biomasa hasta la planta utilizando diversos modos de transporte.

Del mismo modo que ocurre con la biomasa de origen agrícola, en la cuantificación de la biomasa forestal es necesario distinguir entre la biomasa teórica y la biomasa potencial (Panicheli 2008), siendo esta última la que realmente se utilizará para la producción de energía. La biomasa forestal se calculó a partir del Inventario Forestal Nacional, asociándole dicha biomasa a puntos distribuidos cada kilómetro. En lo referente a la logística y el transporte de este residuo, en este estudio se parte de nueve candidatos predefinidos desde los cuales se evalúan los costes globales de biomasa como la suma del coste de la biomasa en la parcela donde se genera (empacado, almacenamiento, traslado, etc.) y el coste propiamente dicho del transporte hasta la planta de bioenergía (en este caso de gasificación). Una metodología similar se presenta en Perpiñá et al. (2008), evaluando tanto la biomasa agrícola como la forestal, aplicada a la Comunidad Valenciana (España) como caso de uso, por el elevado potencial agrícola en esta área geográfica. Un exhaustivo análisis de redes llevado a cabo con Sistemas de Información Geográfica es presentado, teniendo en cuenta los costes fijos y los variables para el cálculo del coste total a partir de una función de costes y la biomasa total.

Utilizando técnicas de teledetección, Xun shi (2008) empleó imágenes satélite Modis/Terra para determinar la biomasa disponible en Guandong según los usos del suelo agrícola. Para ello, se aplicaron unos ratios NPP anuales (Net Primary Production) para cada tipo de cultivo, midiendo la concentración de carbón por unidad de área y aplicando posteriormente un parámetro de conversión para comparar el contenido energético de cada tipo de biomasa. Además, en esta metodología se tuvo en cuenta la temporalidad de los cultivos así como la distribución espacial de los mismos. Mediante la utilización de tecnología SIG identificaron los lugares óptimos para la ubicación de nuevas plantas de biomasa en la provincia de estudio basándose principalmente la distribución espacial de la biomasa útil y la fijación de un umbral de 100 Km. de distancia máxima de transporte desde el origen. Los lugares considerados como candidatos para las nuevas plantas de biomasa se obtienen de la selección de un conjunto



de ubicaciones (puntos), que coinciden en la mayoría de los casos con las intersecciones de las vías de comunicación, separados una distancia máxima de 25km.

### *1.3.2. Logística y cálculo de costes de transporte*

A la hora de instalar una nueva planta de biomasa, los costes de transporte son un factor crítico y de gran relevancia en la planificación de dicha planta. Por lo que respecta a la estimación de estos costes en la gestión de la biomasa residual, la mayoría de los autores coinciden con la idea de su gran importancia a la hora de que un proyecto sea viable económicamente o no. Por eso existen sistemas y modelos para evaluar el transporte y la distribución de dicho recurso. Diversos estudios tienen en cuenta este factor e intentan minimizarlo a partir de la optimización de la logística.

El trabajo realizado por De Mol et al. (1997) a finales de los noventa quizás fuera uno de los más complejos y realistas, en cuanto a logística y optimización, en el ámbito de la biomasa. Esencialmente, consistía en el desarrollo de dos modelos para determinar el coste de transporte y la logística de la biomasa con fines energéticos. El primero es un modelo de simulación logístico desde el origen de la biomasa hasta la planta de bioenergía (Biologics, BIOMass LOGIstic Computer simulation), en el cual se identifican los parámetros de entrada (costes, almacenamiento, temporalidad, demanda, pretratamiento, humedad, poder calorífico, etc.), y la estructura en red que determina las ubicaciones: localización de la biomasa, punto de recogida, puntos de transbordo, ubicaciones de pretratamiento y la ubicación de la planta/s de bioenergía. El segundo es un modelo de optimización logística de la biomasa para minimizar los costes logísticos. Este fue desarrollado aplicando programación lineal mixta-entera donde la función objetivo de optimización fue construida a partir de los costes variables y los costes fijos, y determinó cual era la mejor estructura en red para este fin. Por lo tanto, este trabajo tenía como finalidad ser una herramienta de apoyo en la toma de decisiones, determinando la viabilidad económica de un proyecto o planificación territorial. En la misma línea, y también mediante la aplicación de programación lineal mixta-entera presenta su trabajo Janet Nagel (Nagel 2000) donde desarrolló un modelo matemático en el cual se intentaba minimizar costes y maximizar beneficios para el inversor, al mismo tiempo que minimizar los costes de producción eléctrica y térmica, en el municipio bajo estudio (Branderburg, Alemania). La función objetivo está compuesta por los costes individuales de inversión, los costes fijos de la planta de conversión energética y el sistema de intercambio de calor, los costes variables de la planta de conversión energética, costes de transporte, costes de eliminación de residuos, además de las ganancias por la venta de calor y electricidad. El modelo de decisión está constituido por tres ejes claves que conforman el escenario: los consumidores potenciales, el coste de la planta energética y sistemas estructurales de la biomasa (tanto agrícola como forestal), adoptando unos factores secundarios (combustibles fósiles, biogénicos, electricidad y calor) para obtener la óptima solución tanto a nivel estructural, económico y ecológico en dicha área.

El modelo planteado por R.L. Graham (2000) para evaluar el coste de abastecimiento de la biomasa a partir de cultivos energéticos en once estados de EEUU, es un ejemplo claro de la aplicación de los Sistemas de Información Geográfica en este ámbito. El modelo se divide en cinco componentes: 1) cartografía de la disponibilidad de tierras de

cultivo, 2) El coste de producción de los cultivos energéticos y la implicación ambiental en las características del suelo (erosión, pérdida de nutrientes, pesticidas, etc.), 3) El tercer componente calcula la biomasa potencial anual en cada píxel y su coste de producción asociado, para posteriormente calcular el coste de transporte (a partir de costes fijos, distancias y tiempos de transporte) entre un píxel (1km<sup>2</sup> de resolución) y cualquier otro dentro del mismo estado, 4) Localización óptima de las instalaciones de bioenergía teniendo como parámetro fundamental el coste de distribución de la biomasa en cada píxel (mínimo coste, mejores ubicaciones), y 5) Cuantificación de los cambios en las características de la tierra de cultivo producidos por el cambio a cultivos energéticos. Un dato a tener en cuenta es que tanto en este estudio como en el de Noon y Daly (Noon 1996) la distancia se calcula del mismo modo, primero en línea recta hasta la red de transporte más cercana y posteriormente la distancia utilizando las carreteras.

Algunos autores difieren en el umbral de la distancia de transporte que debe recorrer el camión para obtener los máximos beneficios. En estudios anteriores, se consideraba que ésta no debía ser superior a 40 Km. (Sennblad 1994) y estudios recientes revelan que a distancias de transporte superiores a 100 Km. es todavía el modelo económicamente viable (Hamelinck 2005). Además, cuando una planta de biomasa ha sido instalada para la producción de energía se ha de tener en cuenta factores tales como: la escala de la demanda y la localización de la planta, puesto que estos factores repercuten directamente en el coste de transporte, por lo que es necesario realizar una planificación y previsión a medio o largo plazo. Consecuentemente, se puede evaluar el coste de producción por unidad de volumen como la suma del coste de la maquinaria, coste de recolección de biomasa, costes indirectos, costes fijos y costes de accesibilidad (Kinoshita 2008). En esta línea, en la actualidad muchos estudios utilizan los Sistemas de Información Geográfica para obtener el cálculo de los costes totales tanto en el ámbito forestal como en el agrícola.

A pesar de que desde hace algunos años los SIG aportan un gran potencial para estudios en el ámbito de la biomasa, tal y como se desprende de la bibliografía, existen otros trabajos que prescindan de éstos, pero que no dejan de tener una relevancia considerable en el tema que nos ocupa. Este es el caso del modelo de optimización logística denominado IBSAL (Integrated Biomass Supply Analysis and Logistics) (Sokhansanj 2006). Este modelo simula la trayectoria completa de la biomasa, es decir, la recogida, almacenamiento, pretratamiento y distribución, desde el campo hasta la planta de bioenergía, representado cada uno de ellos por un módulo diferente con su correspondiente formulación para el cálculo. Puesto que no existen datos espaciales, los parámetros de entrada en cada módulo provienen de bases de datos oficiales que proporcionan la biomasa disponible y sus características (contenido de humedad, secado, etc.) así como las condiciones climatológicas (temperatura, humedad relativa, lluvia, viento, etc.). Todos ellos influyen en los costes de transporte, equipo de trabajo a emplear y en la logística global. Al igual que en otros estudios, el cálculo del coste total se basa en costes fijos y costes variables, abarcando las tareas del campo, equipo empleado y estructura logística. Las distancias recorridas para transportar la biomasa por carreteras, utilizando camiones y biomasa embalada, oscilan entre 32 km y 160 km.

En la literatura reciente, empiezan a utilizarse los sistemas de apoyo de tomas de decisiones ambientales (Environmental Decisions Support System, EDSS) basados en Sistemas de Información Geográfica (Frombo 2009; Matthies 2007; Noon 1996; Voivontas 2001). Matthies et al. (Matthies 2007) hacen un revisión de los estudios más

relevantes presentados en la 2nd Biennial Conference of the International Society of Environmental Modelling and Software (IEMSS 2004) donde queda constancia de la integración de estas nuevas tecnologías en campos como la gestión de los recursos naturales, usos del suelo y ecosistemas hídricos principalmente. La complejidad de estos estudios se basa en encontrar un equilibrio entre el medioambiente (ecológico) y el contexto económico-humano (socio-político), para alcanzar la solución óptima de un determinado problema de decisión. Los EDSS provienen de los denominados DSS (Decision Support System), con la particularidad que los EDSS se centran en temas únicamente medioambientales, constituyéndose normalmente por varios modelos, bases de datos, herramientas de valoración y gestión (módulos), todo ello integrado bajo una interfaz gráfica (GUI). A continuación vemos algunos ejemplos de aplicación de un EDSS.

F. Frombo (2009) presenta un EDSS basado en SIG para proponer y evaluar planes estratégicos que minimicen los costes globales teniendo en cuenta además, el impacto ambiental y las nuevas tecnologías energéticas. Probablemente, la novedad en este estudio reside en la introducción de la programación lineal conjuntamente con un EDSS-GIS. Los modelos de decisión son herramientas muy efectivas para estudios de planificación y gestión de los recursos naturales, y en concreto, para la explotación y optimización de la biomasa. El EDSS presentado está dividido en tres módulos: un módulo de SIG, un módulo para el sistema de gestión de la biomasa y un módulo de optimización. Se trata de un modelo estático puesto que la localización de la planta es fija y está establecida, y las variables de decisión son la capacidad de la planta y la cantidad de biomasa anual. La función objetivo a minimizar está formada por términos relacionados con los costes y los beneficios del problema de decisión, que se reduce principalmente a evaluar diferentes tecnologías: gasificación, combustión y pirolisis. Del mismo modo, Voivontas et al. (2001), desarrolla un GIS-EDSS para estimar el potencial energético a partir de residuos agrícolas. En este análisis también se tienen en cuenta diversas restricciones y las posibles ubicaciones candidatas. El coste de producción de electricidad constituye el criterio para identificar las ubicaciones donde la biomasa es económicamente viable para ser explotada.

Refiriéndonos de nuevo a los modelos de decisión, D. Frepazz et al. (2004) presentó un GIS-EDSS para la explotación de la biomasa forestal a nivel regional, e integrando en dicho modelo métodos de programación lineal, para determinar las posibilidades de producción, tanto térmicas como eléctricas, en un área concreta de Italia, dividida administrativamente en municipios, en los cuales se desea instalar una planta. El objetivo del estudio es que el EDSS sirva de apoyo en la toma de decisiones a las partes implicadas en lo que respecta a: tamaño de la planta, producción energética, cantidad de biomasa necesaria para el abastecimiento de cada planta y ubicación y distribución de la biomasa (división espacial en parcelas). Para alcanzar dichos objetivos se formaliza el problema de decisión definiendo: las variables de decisión, la función objetivo (formada por costes de la planta, costes de transporte, costes de recogida, costes de conexión a la red eléctrica y los beneficios de la venta de la energía producida) y las restricciones respecto a la producción energética de la planta y a la biomasa.

### 1.3.3. *Localización óptima de instalaciones*

Los modelos de localización de instalaciones han atraído el interés a investigadores de muy diversas áreas, tales como, economistas, ingenieros, geógrafos, matemáticos, planificadores territoriales, etc., por diferentes razones, tanto en el sector público para la localización de servicios y actividades sociales, como en el privado con el fin de ser competitivos económicamente en el mercado. Estos modelos resultan frecuentemente difíciles de resolver desde el punto de vista de la optimización, incluso aquellos problemas que son considerados los predecesores y básicos como: el problema de p-mediano (problema de Weber), localización de una planta de capacidad limitada o ilimitada, el problema p-centro, problema de localización de cobertura y cobertura máxima. Tradicionalmente, en todos estos problemas de localización, la minimización del coste (o subrogado, la distancia o tiempo) ha sido el principal objetivo a alcanzar.

Actualmente, es conocido el hecho de que en la mayoría de los problemas de localización de instalaciones o de asignación de rutas participan otros objetivos que influyen en la decisión final, lo que se conoce como análisis multiobjetivo (Current 1990). El autor nos presenta en su trabajo una revisión de la literatura dividida en cuatro grandes categorías de objetivos: minimización de costes/distancia, asignación y cobertura de la demanda, maximización de beneficios y preocupación ambiental. Más recientemente, Fernández y Puerto (Fernández 2003) nos presentan un enfoque, tanto exacto como aproximado, para obtener un conjunto de soluciones respecto a un problema de localización multiobjetivo discreto de una planta con capacidad ilimitada, apoyándose en un algoritmo basado en programación dinámica. Este problema consiste en ubicar un conjunto de plantas de entre un conjunto de localizaciones potenciales asignando la demanda, con el objetivo de minimizar los costes fijos de la planta y los de asignación de clientes. El problema experimental fue dividido en cuatro grupos donde las dimensiones abarcan desde 10 sitios candidatos y 20 puntos de demanda hasta 20 sitios candidatos y 50 puntos de demanda.

A continuación, se van a detallar algunos de los trabajos de la bibliografía existente enmarcados principalmente en los modelos de localización de la teoría clásica citados anteriormente, así como una recopilación de los estudios más novedosos y actuales realizados a partir de la extensión de los modelos básicos.

Basado en el clásico problema de localización p-mediano, Serra y Marianov (Serra 1998) formulan un modelo de localización discreta (únicamente en los nodos de la red puede localizarse la nueva instalación) cuyo objetivo es localizar un parque de bomberos en Barcelona (España). La peculiaridad de este estudio es que tanto la demanda cubierta por el servicio como los tiempos de trayectos no son deterministas, es decir, están sujetos a incertidumbres. Desde el punto de vista computacional, Rolland et al. (1996) presentan un algoritmo basado en la búsqueda "tabu" aplicado al problema p-mediano el cual hace más competitivo en términos de velocidad el modelo, mejorando la calidad de las soluciones obtenidas. En la misma línea, nos encontramos con otro algoritmo denominado "sustitución del vértice ajustado" (adjusted vertex substitution) (Ashayeri 2005) que mejora considerablemente los tiempos de cálculo y resolución de un problema de p-mediano, pudiendo aplicar a un gran número de escenarios. Mladenovic' et al. (2007) hace una revisión de la heurística clásica (dividida en constructiva, búsqueda local y programación matemática) utilizada para resolver los problemas p-medianos, así

como presentar los últimos avances utilizando para ello procedimientos metahurísticos (en nomenclatura anglosajona: *Tabu search*, *Variable neighborhood search*, *Genetic search*, *Scattersearch*, *Simulated annealing*, *Heuristic concentration*, *Ant colony optimization*, *Neural Networks*, *Decomposition heuristics*, *Hybrid heuristics*), de donde se concluye que estos mejoran considerablemente la calidad de la solución a grandes escalas en un tiempo razonablemente corto. Recientemente, Richard Church (Church 2008) publica un nuevo modelo mediante programación lineal entera del p-mediano, como extensión del ya formulado por ReVelle y Swain (1974) pero eliminado muchas de las condiciones y variables, consiguiendo una mayor eficiencia en el planteamiento y resolución de grandes modelos.

También existe una vasta literatura en lo que concierne al problema p-centro, entendiendo éste como aquél donde el objetivo a alcanzar es encontrar la localización óptima de p-nodos minimizando la distancia máxima desde un nodo a su centro más cercano. Es el caso de la localización de instalaciones de emergencia, donde, por ejemplo, dado un número de hospitales a localizar, se minimice la distancia entre cada paciente potencial (o área) y el hospital más cercano (Hochbaum 1997). Una variación a la generalización del problema p-centro (Krumke 1995), llamado problema  $\alpha$ -Neighbor p-Center, es la que presentó Chaudhuri et. al (1998). En el trabajo realizado por Averbackh y Berman (Averbackh 1998) se consideran dos matices importantes, la ponderación de las distancias (problema de localización p-centro ponderado) y la incertidumbre de la demanda (no se conoce con exactitud, se asume que únicamente un intervalo estimado de la ponderación de la demanda se conoce). Para resolver el problema desarrollan varios algoritmos polinomiales para la regresión minimax (minimax regret) dependiendo si se trata de un red en forma de árbol o el caso de una red con  $p=1$ . Recientemente, como mejora del problema p-centro, Cheng et al. (Cheng 2007) describe un algoritmo para resolver un problema de redes modelado con grafos de intervalos con unidades de longitud, y Chen presenta una variante del algoritmo de relajación (método iterativo para resolver de manera óptima complejos problemas de localización a partir de fraccionar en pequeños subproblemas) aplicado al problema p-centro, tanto continuo como discreto, para resolverlos eficiente y óptimamente. Para ello, hacen equivalente este problema a localizar los p círculos (cuyos centros son los p servicios) que cubran toda la demanda minimizando el radio del círculo máximo.

Otro grupo clásico de problemas de localización es aquél donde la función objetivo minimiza el coste total, el cual se compone de la suma de los costes fijos de la instalación y la distancia total ponderada, multiplicada por el coste por unidad de distancia y por unidad de demanda (Daskin 1995). Es el denominado problema de localización de instalaciones de costes fijos, dividido en instalaciones de capacidad limitada e ilimitada (CPLP, *Capacitated* or *Uncapacitated Plant Location Problem*). La diferencia fundamental con los modelos anteriores es que en ellos el número de instalaciones a localizar era un dato del modelo, y en éstos existe un conjunto de localizaciones potenciales que han de satisfacer a toda la demanda cumpliendo con la condición de capacidad de las plantas. Cuando, por el contrario, esta condición de capacidad para servir a la demanda no se establece, hablamos de problema de localización de plantas con capacidad ilimitada. Este es el caso de almacenes, fábricas, etc. donde el coste de transporte es uno de los factores del coste total, equiparándolo a los costes fijos involucrados en la construcción de una instalación (Sridharan 1995).. Murray y Gerrard (Murray 1997) presentaron una extensión del problema p-mediano con

capacidad limitada condicionado regionalmente, es decir, asegurarse mediante esta condición del apropiado y aceptable nivel de servicio de una instalación, denominado este concepto como equidad espacial. La solución de este problema de localización-asignación la alcanzaron a partir de la formulación basada en el uso del algoritmo de relajación lagrangiano, al igual que Cortinhal y Captivo (Cortinhal 2003) para delimitar el límite inferior de capacidad de una planta a localizar, utilizando para el límite superior además el algoritmo de búsqueda tabú. Una variante del UCLNDP (Uncapacitated Facility Location/Network Design Problem) introducen Melkote y Daskin (Melkone 2001) en su estudio, pero asumiendo que las instalaciones tienen la capacidad limitada respecto a la cantidad de demanda que pueden servir, formulándolo a partir de programación entera-mixta, y concluyendo con un análisis de sensibilidad para controlar el comportamiento del modelo al variar los parámetros principales. Se desprende del experimento que estos parámetros (costes de la instalación y costes de transporte) son más sensibles a niveles de capacidad más elevados. Recientemente, Wagner et al. (2009) expone un modelo de localización de instalaciones con capacidad ilimitada y demanda incierta, teniendo en cuenta diversos factores de riesgo (beneficios, economía futura, crecimiento de la población, etc.) formulándolo como un problema p-mediano a partir de programación no lineal entera.

De igual modo, también nos encontramos con una extensa literatura relacionada con los problemas de localización con cobertura, siendo el más sencillo el denominado problema de cobertura de conjunto, el cual busca la ubicación del mínimo número de instalaciones que son necesarias para cubrir todas las áreas de demanda contenidas en una determinada unidad de tiempo o de distancia (un radio  $r$  predeterminado). Richard Church y Charles ReVelle (Church 1974) fueron los primeros autores en desarrollar dos procedimientos heurísticos de éste. Una variante del modelo anterior denominada problema de localización de cobertura máxima, donde la diferencia radica en que se cubre la máxima demanda (Diéguez 1996). Diéguez y ReVelle tratan de establecer el límite superior e inferior de este tipo de problemas analizando dos algoritmos basados en relajación lagrangiana (lagrangean relaxation), para mejorar estos límites en cada iteración, y por lo tanto una mejor solución en una red con más de 50 vértices. Concluyen que los heurísticos Lagrangianos son más efectivos en este tipo de problemas de cobertura que la programación lineal utilizada normalmente. De la unión de un modelo de costes fijos y de un modelo de cobertura máxima se centra el estudio de L.K. Nozick (2001). En el estudio se intenta alcanzar el equilibrio entre ambos objetivos, es decir, proporcionar la solución de menor coste pero con un servicio apropiado y de calidad para la máxima demanda. Los métodos elegidos se basan en algoritmos de relajación lagrangiano, para calcular el límite superior e inferior, con el fin de alcanzar una buena solución en una red de más de 100 nodos. En la literatura actual, encontramos nuevos desarrollos en modelos de cobertura, como son los presentados por Berman et al. (2010), divididos en tres grupos: modelos de cobertura gradual, modelos de cobertura cooperativa y modelos de radio variable. Estos tres recientes modelos explican de una manera más realista diversos comportamientos y suposiciones.

Current y Ratick (Current 1995) introdujeron en su estudio la relevancia de los términos “equidad y eficiencia” respecto a la gestión, localización y el transporte de materiales peligrosos. Además, la parte innovadora en el estudio fue considerar la relación entre dos aspectos de este problema, es decir, la localización de las instalaciones peligrosas influye directamente en el diseño de las rutas de transporte de materiales peligrosos, y viceversa.

En este sentido, el modelo matemático incluyó cinco objetivos relacionados con: el fin de minimizar riesgos en el transporte de los materiales y en la propia instalación, la equidad para minimizar la máxima exposición al transporte y a la instalación de cualquier instalación (“minimax”) y, por último minimizar el coste total de transporte y de la instalación. El modelo fue formulado a partir de programación multiobjetivo mixta-entera para generar alternativas eficientes cuando los objetivos entran en conflicto en un determinado problema de localización.

En lo referente a modelos de localización directamente relacionado con los recursos naturales nos encontramos con el estudio llevado a cabo por Church et. al. (1998) cuyo propósito es afrontar la gestión de la industria forestal, tanto pública como privada, aplicando modelos de localización para la resolución de las distintas fases operacionales, tales como: estrategia y planificación forestal, labores forestales, producción, procesamiento y transporte, y protección a la biodiversidad. Además, resaltar en este estudio la implicación directa de los Sistemas de Información Geográfica para el tratamiento de datos espaciales y temporales provenientes de inventarios, siendo exportados a los modelos de optimización. Estos modelos fueron construidos para cada fase forestal mencionada, donde, desde una visión global, el objetivo final es la minimización de los costes, maximizando la recogida maderera protegiendo el medio natural.

Estudios más recientes y centrados en la localización de plantas de bioenergía encontramos el trabajo de Athanasios (2010) donde se presenta un modelo de localización de instalaciones para la explotación energética de la biomasa en Grecia. Mediante el modelo trata de optimizar la estructura completa de gasificación (electricidad y calor) de la biomasa (sistema económico, diseño y características operacionales, localización de la planta, cantidad de biomasa, etc.) empleando un método híbrido, es decir, en primera instancia un algoritmo genético (GA) como punto de partida para obtener una buena solución en la vecindad del óptico global y, posteriormente aplicar el método de programación cuadrática secuencial (SQP) para identificar el óptimo global con una alta precisión y con un tiempo computacional significativamente reducido. El resultado es un mapa de contorno del Valor Neto el cual constituye una herramienta de decisión para futuros inversores respecto a la localización de la instalación. Otro estudio reciente donde se combina GIS y programación matemática es el realizado por Velázquez y Fernández (Velázquez-Martí 2010) donde a partir de un algoritmo iterativo se encuentran las ubicaciones de una planta de bioenergía minimizando los costes logísticos para abastecer a los consumidores potenciales. Los criterios más relevantes en el estudio son que toda la energía producida por cada planta tiene que ser consumida y que toda la energía producida tiene que ser transportada con un coste mínimo. El caso de estudio es llevado a cabo en las comarcas de La Hoya de Buñol y la Plana de Utiel (Comunidad Valenciana)

Desde los inicios de la teoría de la localización espacial, la vertiente práctica y aplicada ha encontrado diversos obstáculos, sobre todo en lo referente a la adquisición de datos necesarios para resolver un problema de localización específico de un área, y por el elevado cálculo computacional requerido para resolverlos. Con la modernización informática y tecnológica de los últimos décadas aparecen los Sistemas de Información Geográfica como una herramienta capaz de almacenar, manipular, gestionar, analizar, visualizar y representar cartográficamente datos espaciales de un elevado número de

disciplinas (Church 2002). Richard Church nos presenta en este artículo la relación existente entre los SIG y la teoría de la localización, así como numerosos ejemplos de aplicación y desarrollos, destacando el área de gestión y planificación del suelo relacionada directamente con la protección del medio ambiente y la biodiversidad.

Otra muestra de la integración de los Sistemas de Información geográfica en la teoría de la localización para la planificación de instalaciones en el sector público en la ciudad de Hong Kong la presentaron Yeh y Hong Chow (Gar -On Yeh 1997). En él se describe un modelo de localización-asignación para encontrar la mejor ubicación de instalaciones públicas en lo que se refiere a minimizar distancia/tiempo a los consumidores, aplicando el problema de p-mediano. Para ello, se apoyaron en un Sistema espacial de toma de decisiones (*Spatial Decision Support System*, SDSS) donde los decisores implicados dispusieron de un conjunto de soluciones posibles, así como de la posibilidad de aplicar diferentes escenarios, objetivos, restricciones y otros parámetros del modelo. La disponibilidad de los datos geográficos de usos del suelo, conjuntamente con las herramientas de un SIG y la utilización de modelos matemáticos, provocaron una combinación perfecta para desarrollar un SDSS y evaluar la localización de espacios abiertos de ocio en Hong Kong.

De la combinación de un problema de localización de instalaciones y un problema de diseño de rutas de distribución surge el denominado problema de localización-asignación de rutas de vehículos (*location-routing problem*) (Lopes 2008). Se trata del desarrollo de una reciente herramienta para la toma de decisiones (*decision-support tool*) vía web realizada mediante servidores de mapa (WMS) OpenGis, permitiendo el acceso a partir de una interface gráfica. El modelo busca determinar que cocheras/garajes tienen que ser establecidos e identificar las rutas desde estos lugares a los consumidores/clientes minimizando el coste total (localización y distribución). Para ello, es necesario introducir una serie de datos en la aplicación como: localización de los clientes, demanda asociada a cada cliente, localizaciones potenciales para las cocheras, capacidad de las cocheras y capacidad de los vehículos de la flota.

#### ***1.3.4. Evaluación multicriterio y Sistemas de Información geográfica***

Las técnicas de evaluación multicriterio han sido aplicadas en un gran número de disciplinas, como veremos en el capítulo 4 dedicado íntegramente a la EMC-GIS, utilizando diferentes criterios y factores según el objeto del estudio, tales como la planificación y ordenación territorial, localización de instalaciones, mapas de usos del suelo, reducción de riesgos naturales e impactos ambientales, físicas, etc. Principalmente, se utilizan para ayudar y facilitar la toma de decisiones de determinados problemas que atañen a un territorio, encontrando para ello la mejor solución. Con esta finalidad surgen los denominados Sistemas de apoyo para la toma de decisiones (Decision Support System, DSS) tratándose de un nexo de unión entre la información que se gestiona a partir de técnicas de modelado y la elección de una decisión por parte de gestores ante una determinada situación.

Uno de los primeros estudios de Evaluación Multicriterio en el ámbito de las Energías Renovables, concretamente en la eólica local, fue el de Voivontas (1998). La metodología desarrollada introducía una serie de acciones en cada nivel de análisis,



como era la estimación del potencial de las fuentes de energía renovables, la valoración de la influencia local de dichas fuentes, la evaluación de las restricciones impuestas por la tecnología disponible y la valoración de los beneficios esperados. En este trabajo se exalta la utilización de los Sistemas de Información Geográfica (MapInfo professional) para fines energéticos, debido a la dispersión espacial y a la dependencia que poseen las energías renovables respecto del lugar donde se originan, así como del coste energético de producción. Concretamente desarrollan un DSS para estimar el potencial eólico disponible y tecnológico que representará el máximo suministro energético obtenible, comparando diferentes escenarios en Creta (Grecia).

Otro estudio llevado a cabo por Ralf Grabaum (1998) utiliza la evaluación multicriterio basada en técnicas SIG, aplicada a la planificación y desarrollo regional en Alemania. Este estudio se centra en los métodos de valoración funcionales aplicados a los siguientes objetivos (funciones de regulación): regeneración de aguas subterráneas, riesgos de erosión superficial y escorrentía superficial. Además, también fue valorada la capacidad de producción agrícola de la zona. En definitiva, el conjunto de variables que se identificaron para el análisis en el SIG fueron: tipos de biotopos, usos del suelo, tipos de suelo, pendiente, elevación, canales fluviales, límites, precipitación, evaporación, cobertura superficial, infiltración etc. A partir de aquí, se plantea un método elaborado por Dewes (1985) que consiste en la optimización multicriterio, donde el óptimo se obtiene minimizando la máxima diferencia entre el valor-objetivo y el valor-óptimo. Esta metodología permite ayudar a los planificadores a reducir el conflicto entre usos del suelo e impacto ambiental.

De la combinación entre la evaluación multicriterio y las herramientas GIS aplicadas al análisis de riesgos naturales, surge lo que K. Chen (2001) denomina MCE-GIS, incorporando tres métodos de evaluación distintos para el mismo análisis y comparando así sus resultados para la posterior toma de decisiones. Estos fueron: *weighted linear combination* (WLC), *techniques for order preferences by similarity to ideal solution* (TOPSIS) y *compromise programming* (CP). El estudio en cuestión se centraba en determinar las áreas prioritarias para la quema de arbustos reduciendo el riesgo de incendio. Después de realizar el análisis y comparar los resultados, se optó por el WLC. Lo más destacable en este estudio es que ya aparecen los pasos o fases a seguir para realizar un MCE-GIS que actualmente continúan utilizándose. Estas son: Identificar el problema/objetivo, identificar los criterios relevantes, determinar los pesos, enlazar criterios y pesos a través del GIS, adoptar una decisión provisional, realizar un análisis de sensibilidad e interpretar los resultados.

Íntimamente relacionado con el tema que estamos abordando de EMC en el ámbito de las energías renovables encontramos los estudios realizados por Cheng-Dar y Grant Gwo-Liang (Cheng-Dar 2007) en Taiwan, y Thomas Buchholz, et al, en Uganda (2009). El primero de estos estudios se ha desarrollado en un entorno GIS, mientras que en el segundo la relevancia se centra en la determinación de los criterios y el establecimiento de los pesos en el ámbito de las energías renovables.

El trabajo realizado en la población de Chingu (Taiwan) deja constancia de la efectividad de la aplicación de un DSS (Decision Support System), con la ayuda de un Sistema de Información Geográfica, para evaluar la viabilidad de explotar fuentes de energías renovables a escala local. Para ello se evalúa el potencial energético, se realiza

un análisis de costes (retorno de la inversión) y los incentivos legales, con el objetivo de ser utilizado como una herramienta para atraer a los inversores, con la participación del gobierno local. Las fuentes energéticas renovables que se explotan en la zona son la eólica, solar fotovoltaica y biomasa.

El análisis multicriterio para la valoración de sistemas bioenergéticos llevado a cabo por Buchholz, et al (2009), tiene como objetivo facilitar el diseño y la implementación de proyectos sostenibles de bioenergía mediante la aplicación y comparación de cuatro herramientas de decisión. A partir del caso de estudio en Uganda se valora la efectividad y las limitaciones de estos cuatro procedimientos: Super Decisions (aplica el método de las jerarquías analíticas), DecideIT (emplea el recientemente desarrollado método Delta), Decision lab (emplea el método Promethee II) y el NAIADE (emplea el método Naiade, desarrollado en el Centro de Investigación de la Comisión Europea, basándose en técnicas de comparación por pares). Nueve criterios fueron establecidos en base a diferentes factores tales como ecológicos, sociales y económicos. Los resultados del análisis revelan la enorme importancia de los criterios sociales frente a los demás mencionados, orientados a la generación de electricidad con gasificación, en las zonas rurales de Uganda. La herramienta multicriterio Super Decisions es la que mejor se adapta en este estudio, y el único que permite la participación tanto de expertos como de grupos de interés para establecer todos los datos de entrada del modelo global (selección de criterios, pesos, escenarios, análisis de sensibilidad, fácil computación, etc.).

En el ámbito forestal C. P. Mitchell (2000) presenta un sistema de toma de decisiones (DSS) para aplicaciones de bioenergía, desarrollando un modelo que integra la producción de biomasa, la conversión y la generación de electricidad. En este artículo se enumera una larga lista de modelos implementados (aplicaciones) con la capacidad de un DSS orientados al campo de la bioenergía. Principalmente, se establecen los módulos interconectados de: el propio sistema de producción, sistema de recogida, almacenamiento y secado, transporte y distribución, así como un módulo de conversión de la energía y producto final (BEAM, *Bioenergy assesment model*).

Veremos en el capítulo 4 la importancia que conlleva la realización de un Análisis de Sensibilidad. Este tipo de análisis no es una práctica muy habitual, y en la mayoría de los casos el análisis consiste en llevar a cabo una variación en pequeños intervalos de los pesos otorgados a los factores. Como hemos mencionado, la integración entre Evaluación multicriterio y SIG esta plenamente establecida en muchísimas disciplinas, sin embargo la realización de dicho análisis de sensibilidad como último paso en todo el problema de decisión, empleando variables espaciales y métodos rigurosos (métodos globales), ha sido pasado por alto en muchos estudios. En otros casos, el problema planteado sí está directamente relacionado con variables espaciales en un entorno SIG, pero no se trata de un problema de evaluación multicriterio.

Este es el caso del estudio realizado por Crosetto y Tatantola (Crosetto 2001) donde se establece una clara diferencia entre un análisis de incertidumbre y un análisis de sensibilidad propiamente dicho. Ambos análisis pueden ser utilizados en la fase de planificación mediante herramientas SIG para optimizar la asignación de los recursos en la adquisición de los datos espaciales. Para ello describen un procedimiento específico indicando las fases que lo componen, destacando el análisis de sensibilidad (a partir de simulaciones utilizando el método Sobol y FAST extendido, y para el análisis de

incertidumbre el método Morris) como la clave para cuantificar la relativa importancia de las diferentes fuentes de incertidumbre. En este estudio también se hace mención a la aplicación del método de Montecarlo (método analítico) por su fácil implementación y por tratar modelos de cualquier grado de complejidad, lo que lo hace uno de los métodos más extendidos en un gran número de disciplinas.

Siguiendo el hilo del procedimiento general que describen los anteriores autores para los análisis de incertidumbre y de sensibilidad pero aplicados a un modelos hidrológico, encontramos el trabajo de D'Ovidio y Pagano (D'Ovidio 2009) donde proponen un enfoque estocástico (contrario al modelo tradicionalmente determinista) para el diseño óptimo de plantas de biomasa, concretamente comparando soluciones tecnológicas distintas (generación de vapor, ciclo de gas o ciclo combinado). Para ello, desarrollan una herramienta de decisión (SMD tool, Stochastic multicriteria decision tool) con el objetivo de discriminar la mejor solución entre las diversas alternativas. Los resultados numéricos de la aplicación son expresados en términos de función de densidad de probabilidad y variables aleatorias, caracterizando la incertidumbre del modelo. Estas funciones de densidad del Profitability Index tienen en cuenta como la incertidumbre de los datos de entrada se propaga por el modelo y se refleja en los resultados. La media y la desviación estándar del  $PI_{max}$  (valor máximo del índice PI) y el valor óptimo de  $R_0$  (radio de recogida de biomasa) son los indicadores principales para escoger la mejor alternativa entre las tres propuestas. Para resolver el modelo estocástico se aplica el conocido método de Monte Carlo realizando 10.000 simulaciones.

#### **1.4. ÁREA DE ESTUDIO**

En este apartado definiremos el área de aplicación de cada metodología.

La metodología enmarcada en el proyecto BIODER (ver apartado 5.2) fue aplicada a tres provincias del territorio español con una diferenciación elevada en la tipología de cultivos agrícolas y zonas forestales. En concreto las tres provincias seleccionadas fueron: Valencia como representación de escenario mixto, compartiendo zonas forestales y cultivos agrícolas; Ciudad-Real como representación del escenario con una gran ocupación del suelo por cultivos de secano (herbáceos, vid, olivar), y por último, Lugo como escenario con elevada superficie forestal. En la Figura 5 se representan las tres provincias del estudio, llevándose este a cabo a nivel comarcal. Pueden consultarse las comarcas que pertenecen a cada una de ellas en la de Tabla 3.

La metodología llevada a cabo mediante la aplicación de técnicas de evaluación multicriterio y los modelos de localización en entornos SIG para la localización de plantas de biomasa han sido estudiados en la comarca de Utiel-Requena (ver apartados 5.3 y 5.4). Los principales motivos para la elección de esta comarca han sido: en primer lugar, porque esta comarca integra parte forestal y agrícola y puede estudiarse la contribución de residuos biomásicos para la generación de energía provenientes de uno u otro tipo. En segundo lugar la satisfactoria existencia de plantas de biomasa en la comarca. En tercer lugar, esta comarca es la que mayor extensión tiene en el Comunidad Valenciana y por tanto ofrece mayores posibilidades en la aplicación de los modelos de localización con restricción de distancias.



Figura 5. Mapa de localización de las provincias bajo estudio

	COMARCAS	POBLACIÓN	SUPERFICIE	DENSIDAD
CIUDAD - REAL	Campo de Calatrava	190.281	2.983,1	63,78
	Campos de Montiel	29.662	2.894,3	10,24
	Mancha	236.881	3.965,6	74,32
	Montes Norte	29.934	3.880,91	7,71
	Montes Sur	13.115	1.308,9	10,01
	Pastos	68.976	3.965,6	17,39
LUGO	Central	153.199	2.572,3	29,55
	Costa	77.245	1.465,17	52,72
	Montaña	4.412	438,45	10,06
	Sur	55.486	1.985,8	27,94
	Terra Cha	50.038	2.073,75	24,13

VALENCIA	Campos de Liria	108.889	775,8	140,35
	Enguera y la Canal	17.833	715,7	24,91
	Gandia	180.000	429,6	410,23
	Hoya de Buñol	62.178	1.227,3	50,6
	Huerta de Valencia	1.457.190	594,36	2451,7
	La Costera de Játiva	77.981	551,94	141,28
	Requena-Utiel	40.735	1.831,2	22,23
	Riberas del Júcar	266.863	929,79	286,96
	Sagunto	77.981	443,41	175,86
	Valle de Ayora	9.604	908,04	10,57
	Valles de Albaida	90.783	721,6	125,8

**Tabla 3. Información de las comarcas de las provincias de estudio (superficie en km<sup>2</sup> y densidad de población en hab./km<sup>2</sup>)**

En la Tabla 4 se muestran algunas características demográficas de los nueve municipios que configuran la comarca. Destacar que el municipio con mayor densidad de población es Utiel, aunque Requena tienen mayor número de habitantes.

MUNICIPIO	POBLACIÓN	SUPERFICIE	DENSIDAD
Requena	21.278	814,20	25,10
Utiel	14.547	236,90	50,87
Venta del Moro	1.526	272,60	5,33
Camporrobles	1.299	89,50	15,69
Sinarcas	1.297	102,50	11,71
Caudete de las Fuentes	919	34,60	22,34
Fuenterrobles	792	49,50	14,76
Villargordo del Cabriel	692	54,50	12,18
Chera (Valencia)	619	71,60	9,27

**Tabla 4. Población, Superficie y densidad de los municipios de Utiel - Requena**

La comarca de Utiel-Requena (Figura 6) está cubierta por las hojas cartográficas del Mapa Topográfico Nacional a escala 1:25.000 (MTN25) números: 665, 666, 693, 694, 718, 719, 720, 744 y 745. El Sistema de referencia es el European Datum 1950, proyección U.T.M (Universal Transverse Mercator) en el huso 30 Norte. A continuación, en la Figura 7 se adjunta un mapa de situación de la zona de estudio y en la Figura 8 los tipos de cultivos y vegetación natural.

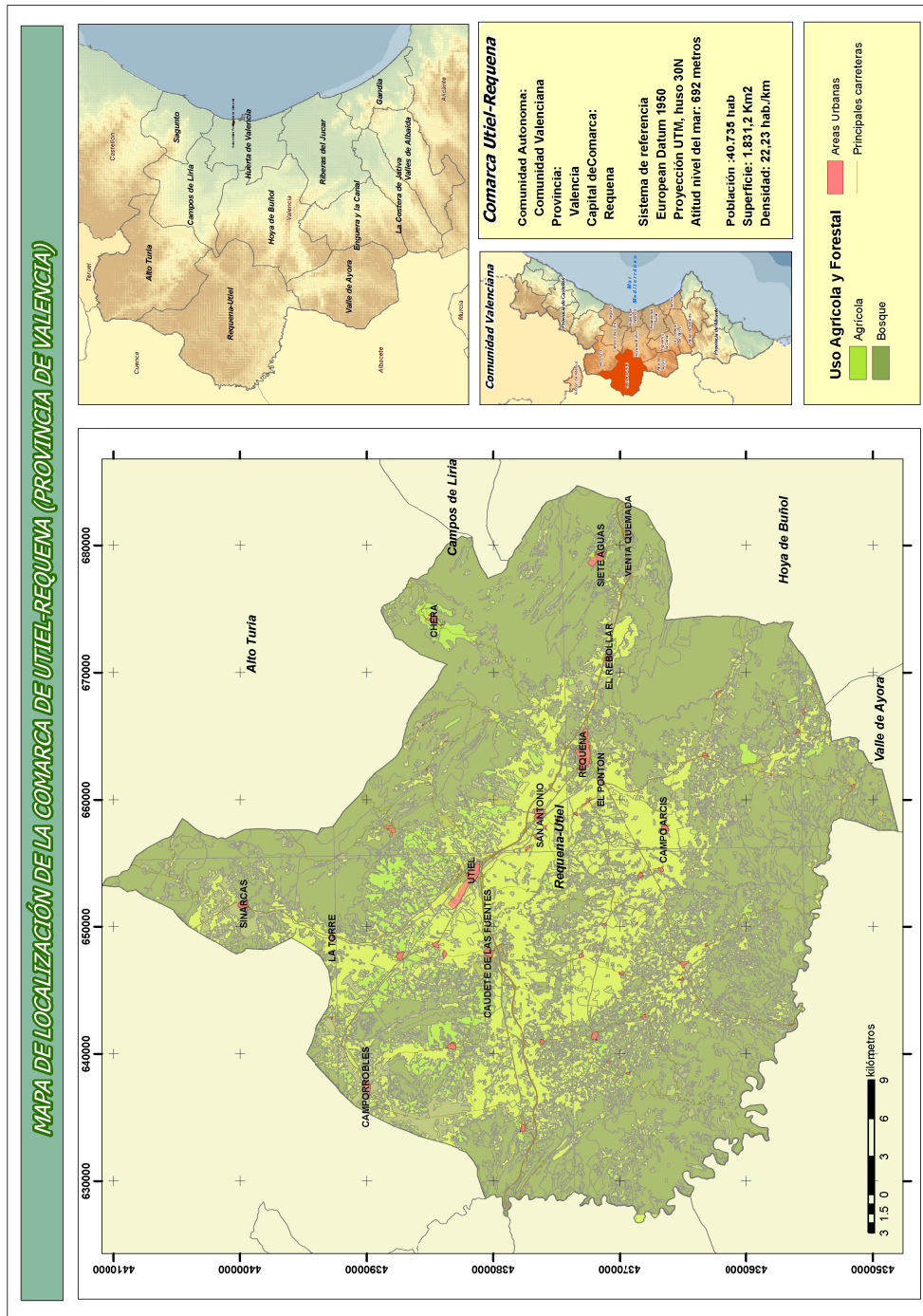


Figura 6. Mapa de Localización de la Comarca de Utiel-Requena

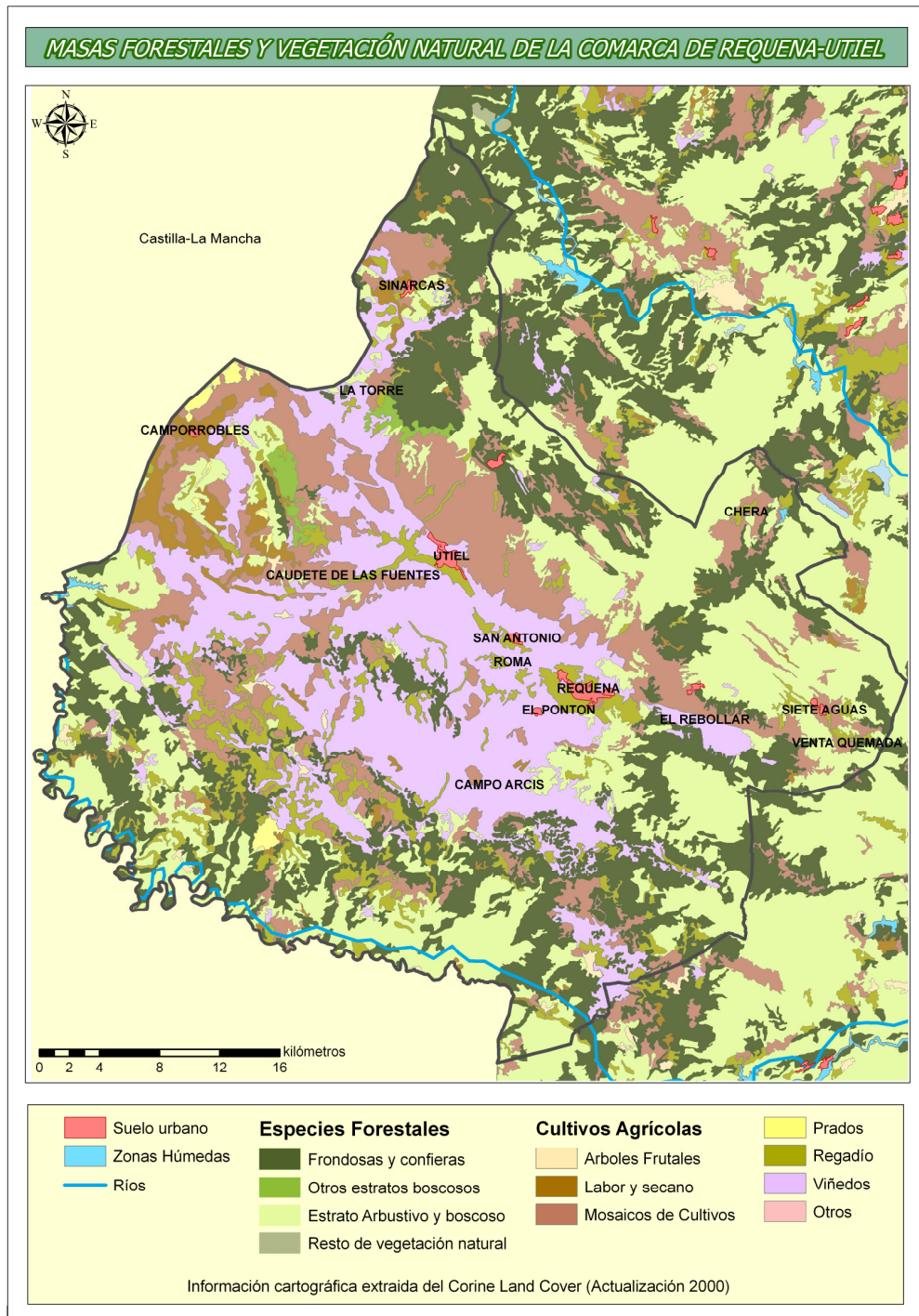


Figura 7. Tipos de cultivos y Especies forestales en la Comarca de Utiel-Requena

### 1.5. FUENTES DE INFORMACIÓN ESTADÍSTICAS Y CARTOGRÁFICAS

Las principales fuentes de **información estadísticas** han sido obtenidas a partir de:

- Instituto nacional de Estadística. Dirección web: <http://www.ine.es/>
  - Censo Agrario: Distribución de superficies y usos, tamaño de explotaciones (1999)
  - Agricultura: Distribución de superficies y usos, tamaño de explotaciones (1999-2004)
  - Edificación y vivienda: Censo población y vivienda (2001)
  - Población: Censo población y vivienda (2001)
- Guía DUNS de las 50.000 mayores empresas de España y Guía ARDAN 12.500 mayores empresas de la Comunidad Valenciana: facturación, actividad y localización (2003 – 2006)

Las principales **fuentes de información cartográfica** utilizadas han sido las siguientes:

- Mapa de Cultivos y aprovechamientos de España. Cartografía a escala 1:50000 del Ministerio de Agricultura, pesca y Alimentación, diferenciando entre superficie cultivada y especies forestales.
- Segundo y Tercer Inventario Forestal Nacional (IFN2 e IFN3). Cartografía digital a escala 1:50000 de las provincias de la zona de estudio. Lugo, Ciudad Real y Valencia. Ministerio de Medioambiente (Dirección General de Biodiversidad).
- Cartografía base. Proporcionada por la empresa Geograma S.L. (VAR de Teatlas) principalmente para el empleo de las redes de transporte correspondiente a una escala 1:10000. Elipsoide WGS84. Proyección UTM, Zona 30.
- Plan Nacional de Ortofotogrametría área (PNOA). Realización del Mapa de pendientes de las provincias de las zonas de estudio. Las características principales del Modelo Digital de Terreno del PNOA son: 5m de paso de malla, Vuelo digital 0.42m/píxel, Sistema de referencia Geodésico: ETRS89 y Proyección: UTM. Instituto Geográfico Nacional.
- Cartografía de la serie temática: “Litología y aprovechamiento de rocas industriales y riesgo de deslizamiento en la Comunidad Valenciana” y “El suelo como recurso natural”. Conselleria d’obres públiques urbanisme y transport 1998.
- Cartografía de espacios naturales y protegidos de las zonas de estudio: Lugo, Valencia y Ciudad Real. Estas se han obtenido de las páginas de de la Consejería de Medio Ambiente y Desarrollo Rural de Castilla La Mancha:  
<http://www.europarc-es.org>  
<http://smascintra.jccm.es/inap/forms2/inapf001.php#capas>
- Cartografía oficial nacional del Ministerio de Medio Ambiente y Rural de la red Natura2000 a escala 1:50.000 de la página  
[www.mma.es/portal/secciones/biodiversidad](http://www.mma.es/portal/secciones/biodiversidad)
- Libro Digital del Agua: cartografía y estadística nacional facilitada por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino cuya temática versa



sobre los usos del agua y las principales variables que afectan al estado cuantitativo y cualitativo de la misma.

▪ BCN25: Base Cartográfica Numérica 1:25.000. Base de datos geográfica 2D de referencia a escala 1:25.000 que cubre toda España y está formada a partir de los ficheros digitales del MTN25. Sistema Geodésico de Referencia ETRS89 (en Canarias, REGCAN95, compatible ETRS89), proyección UTM en el huso correspondiente.

▪ Corine Land Cover al nivel 5°, siendo ésta una base de datos de Ocupación del Suelo con escala de referencia 1:100.000, a nivel europeo, basada en una nomenclatura jerárquica de 44 clases.

Como se observa, la confluencia de cartografías de diferentes instituciones y características es muy diversa. Por ello, es importante mencionar que los mapas realizados y mostrados a lo largo de esta tesis tienen como sistema de referencia el European Datum 1950 con proyección UTM en el huso 30 Norte.

La cartografía base información cartográfica de la que disponemos está dividida en los siguientes grupos: Comunicaciones, Hidrografía, Orografía, Abastecimiento, Límites Administrativos, Zonas urbanas, Cultivos y especies forestales. A continuación se va a explicar cual es la implicación de cada una de las capas de información en el análisis. Las capas anteriormente mencionadas tienen una estructura vectorial, es decir, se identifican los elementos como puntos, líneas o polígonos. Únicamente para la elaboración del Modelo digital de elevaciones se ha utilizado la estructura raster.

1. Los **Límites Administrativos** serán los que delimiten la zona de actuación y están estructurados de una manera jerárquica (estado, provincial, comarcal y municipal). Dependiendo del tipo de proyecto será necesario establecer cual es el adecuado para alcanzar los objetivos.
2. Las **Vías de Comunicación** tienen una importancia considerable en este proyecto puesto que a partir de ellas se estudiará la viabilidad económica en lo referente al transporte de la biomasa, es decir, se realizará el cálculo del “camino más corto” que deberán seguir los vehículos pesados encargados de recoger la biomasa generada en cada punto origen hasta la planta. Para llevar a cabo dicho cálculo son necesarios los ejes de cada vía de comunicación así como sus atributos. De modo que, éstas deben estar lo más actualizadas posible y cada uno de los tipos de vías conectados entre sí, formando una red homogénea.
3. Otra de las informaciones cartográficas más importantes es la de **Cultivos y forestal** debido al interés, en este estudio, en la identificación y cuantificación de las zonas potenciales de residuos agrícolas y forestales para la obtención de biomasa. A partir de estos residuos y de los *coeficientes* (t/ha) y otros parámetros que a cada tipo de cultivo y especie forestal le corresponde podremos calcular la Biomasa Disponible Total en el área de estudio.
4. La información de **Abastecimientos** hace referencia a las conducciones de gas, líneas eléctricas de alta tensión y tuberías superficiales. Esta información será necesaria para obtener los lugares donde la ubicación de una central de bioenergía no es recomendable. A partir de estos elementos se generarán determinadas zonas de influencia.
5. Será necesario conocer, también, cual es la distribución espacial de la **Población** puesto que puede verse afectada por esta nueva instalación. Deben establecerse

- unas medidas de seguridad (distancias mínimas a la central de bioenergía) tanto en las zonas urbanas de alta densidad como en las de baja. A partir de estos elementos se generarán determinadas zonas de influencia.
6. Existen zonas con gran valor medioambiental que también deben ser tenidas en cuenta en este tipo de estudios de localización de instalaciones. Hemos destacado la **Hidrografía** y **Lugares Protegidos y de Interés Medioambiental**. A partir de estos elementos se generarán determinadas zonas de influencia.
  7. La **Orografía**, así como otros elementos que actuarán como líneas de ruptura, serán determinantes para la elaboración del MDT. Con ello, posteriormente, se podrá determinar las pendientes de la zona de estudio. Otras características del terreno son la litología, la fisiografía y la geomorfología necesarias para evaluar la inestabilidad del terreno y los procesos de erosión, la rugosidad del relieve y desprendimientos, para el asentamiento de una actividad.
  8. La **Malla regular** se extiende sobre la zona de estudio e identifica la unidad mínima de información. Esta no es una información cartográfica en si misma sino que es una herramienta de apoyo para calcular la densidad superficial de la biomasa disponible generada en el propio SIG.

### ***1.6. CONTENIDOS Y ESTRUCTURA DE LA TESIS***

Con la finalidad de alcanzar los objetivos planteados en la presente tesis doctoral, que han motivado su realización, se han abordado diferentes disciplinas, atendiendo a: la contextualización de las energías renovables y en concreto la problemática del área de la biomasa como recurso energético, los modelos de localización de instalaciones con la consiguiente necesidad de introducir nociones básicas de programación lineal y la Evaluación multicriterio en el entorno de los Sistemas de Información Geográfica.

El capítulo 1 introduce, contextualiza, justifica y motiva al conocimiento de las energías renovables, centrandó la atención en el área de la biomasa agrícola y forestal residual como recurso energético. En este capítulo se presenta la situación energética en el marco europeo, nacional y local de las energías renovables, continuando con la justificación y objetivos de la presente tesis doctoral, realizando posteriormente una revisión de la literatura del paradigma actual, y también pasada y futura en relación a las cuatro ideas básicas de esta tesis, evaluación de la biomasa agrícola y forestal, logística y cálculo de costes de transporte, localización óptima de instalaciones y Evaluación multicriterio y Sistemas de Información geográfica.

El capítulo 2 contiene los conceptos básicos para la optimización logística como es la estructura y factores de un sistema de transporte, los componentes de un sistema de distribución física, la relación entre la industria y el transporte con el fin del establecimiento de los costes. Así mismo, se especifican los costes de transporte de los recursos biomásicos y la función de costes que se aplicará a lo largo de este estudio.

El capítulo 3 contiene el cuerpo teórico de esa tesis doctoral, y pretende por una parte, introducir la programación lineal con el objetivo de formular y resolver problemas de optimización, además de describir los algoritmos comúnmente utilizados para resolver este tipo de problemas NP-duros de optimización combinatoria, describiendo para ello ciertos heurísticos y meta-heurísticos, técnicas de relajación, el algoritmo de

ramificación y acotación, y la programación dinámica. Por otra parte, en la segunda parte del capítulo, se describen los modelos clásicos de localización de instalaciones formulados a partir de programación lineal entera, además de dedicar un apartado a aquellos modelos que se consideran una extensión de los básicos, como los modelos con jerarquías, asignación de rutas, problemas de localización Hub, entre otros. Este capítulo termina exponiendo algunos ejemplos de programas informáticos que reflejan la integración de los Sistemas de Información Geográfica en el ámbito de la localización de instalaciones.

El capítulo 4 también tiene un peso importante a nivel teórico puesto que presenta las diferentes técnicas utilizadas para la realización de una evaluación multicriterio en entornos SIG. Uno de los apartados más importantes de este capítulo muestra las técnicas multicriterio más empleadas, para continuar con los métodos para la realización de un análisis de sensibilidad de los criterios implicados. Se concluye el capítulo presentando algunos ejemplos de integración de las técnicas EMC-SIG.

En el capítulo 5 se describen las tres metodologías llevadas a cabo para abordar y responder los objetivos planteados en el área de la biomasa, concretamente en lo que respecta a su evaluación y a la instalación de plantas de biomasa. La primera metodología se basa en Sistemas de Información Geográfica íntegramente y su aplicación directa constituyó el proyecto nacional BIODER. La segunda metodología emplea técnicas de evaluación multicriterio para evaluar el grado de adecuación de un territorio para albergar una planta de biomasa, finalizando con un análisis de sensibilidad de las variables implicadas. Y la tercera metodología aplica modelos de localización formulados mediante programación lineal, a las áreas aptas seleccionadas como resultado de la EMC.

En el capítulo 6 se presentan las conclusiones generales que se han alcanzado fruto de la investigación del presente trabajo.

El capítulo 7 presenta la divulgación del conocimiento adquirido mediante la publicación de artículos científicos y asistencia a congresos. El capítulo 8 discute cuales pueden ser las futuras líneas de investigación en base al estado del conocimiento actual, es decir, los futuros proyectos. El capítulo 9 detalla las fuentes bibliográficas y documentales que han sido consultadas para la realización de esta tesis doctoral.

Para concluir el presente trabajo se presentan seis anexos. El Anexo I tiene el objetivo de introducir al estudio de las energías renovables, en concreto la biomasa, sobre todo desde un punto de vista logístico, ambiental y económico. El Anexo II explica detalladamente la metodología del proyecto BIODER para evaluar la biomasa agrícola y forestal en primera instancia, para posteriormente presentar la estrategia logística de recogida y distribución de dicho recurso mediante la aplicación SIG. El Anexo III describe de manera detallada los factores empleados en la EMC y sus correspondientes matrices de comparación por pares. El Anexo IV muestra la distribución de cada uno de los factores empleados en la EMC para la realización del análisis de sensibilidad. El Anexo V presenta cierta información asociada referida a los modelos de localización. Y por último, el Anexo VI explica el procedimiento seguido para llevar a cabo las estrategias logísticas con el software ArcInfo Workstation.



---

## **CAPÍTULO 2.**

### **CONCEPTOS GENERALES DE UN SISTEMA DE TRANSPORTE**

---

*Las relaciones existentes entre el espacio, el transporte y la economía son evidentes desde hace décadas y es por este motivo por el cual se abordaron los primeros estudios de rutas de transporte para canalizar flujos desde un origen hasta su destino. En este sentido, como vimos en el planteamiento de la investigación, se hace necesario para la optimización logística y del transporte conocer la estructura y los factores que la componen. Así mismo, un Análisis de Redes es el término que engloba estos conceptos a nivel matemático y, actualmente, también digital, permitiendo plantear y resolver un gran número de problemas prácticos de optimización con herramientas y técnicas más modernas.*



### 2.1. INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS DE REDES

Desde finales de los años sesenta en Europa ya se concebían como relaciones inseparables las existentes entre el espacio, el transporte y la economía, apoyadas por las teorías de algunos geógrafos, economistas, sociólogos como Weber, Lösch e Isard. Estas relaciones nos llevan a establecer vínculos espaciales entre organización y territorio, a través de una red de transporte que canaliza los flujos de mercancías, personas, capital e información, hacia los centros de origen y de destino distribuidos por el territorio (Seguí 1991).

En este mismo periodo se comienzan a realizar los primeros análisis cuantitativos, es decir, se abordan los primeros estudios sobre todo de las ciudades y sus áreas de influencia medidas en flujo, dejando al margen los estudios relacionados con las rutas de transporte y su relación con otros indicadores económicos hasta fechas posteriores. En estos primeros trabajos destaca el modelo de oportunidades de Ullman (1957), el análisis dimensional de las redes realizado por Ginsburg en 1961 o la aplicación de la teoría de los grafos de los geógrafos Garrison y Marble, inicialmente desarrollada por el matemático Euler en el siglo XVIII.

Posteriormente, estos primeros análisis de la geografía cuantitativa dieron paso a nuevas vertientes en la geografía de los transportes, tales como el análisis de las redes, el tratamiento y análisis de los flujos, y la introducción de los modelos de predicción de demanda y así como de otros modelos provenientes de diferentes disciplinas. En los siguientes estudios fue introducida la variable temporal y como influía esta en los desplazamientos por el territorio (Seguí 1991).

Como definición de **red** se considera un sistema interconectado de elementos lineales (aristas), que forman una estructura espacial por la que pueden pasar flujos de algún tipo: personas, mercancías, energía, información, etc. (Bosque 1997). En una red se distinguen los elementos lineales (o aristas) que interrelacionan en las intersecciones (nudos de la red), las cuales son elementos puntuales. Cada elemento lineal tiene un origen y un destino de los flujos que pasan por él. Además, uno de los atributos más importantes asociado a cada una de las aristas que forman una red es la *longitud* o *coste* de recorrerla, pero existen otros atributos temáticos como la demanda de un bien o producto a lo largo de una longitud. Los nudos de la red tienen incorporados igualmente variables temáticas.

En la realidad geográfica se pueden encontrar numerosos objetos espaciales de tipo lineal, tanto de origen natural como los ríos pertenecientes a una cuenca hidrográfica como los humanos, por ejemplo una red de carreteras o ferrocarriles de un país. Existen algunos tipos de redes que requieren mayor atención debido a su importancia, son las denominadas redes de comunicaciones (que normalmente forman circuitos), como por ejemplo las carreteras, ferrocarriles, distribución de agua, de energía, etc.

Para representar este tipo de fenómenos de la realidad se pueden esquematizar como una red: por ejemplo, las carreteras serán representadas como las aristas de la red que unen diversas ciudades y pueblos, siendo éstos los nudos de la red. De esta forma una red puede hacerse equivalente a un **grafo** matemático, es decir, a un conjunto de puntos (las intersecciones de las líneas) y un conjunto de líneas manteniendo una serie de relaciones

entre pares de puntos. Esto sería de una manera muy sintetizada la esencia de la teoría de grafos, la cual permite conocer la estructura completa de una red o su desarrollo, a partir de unos datos parciales iniciales. Además, también pueden llegar a conocerse determinados problemas de índole geográfica que se generan a partir de los asentamientos y las redes de transporte, en función de las propiedades topológicas y el grado de conectividad de la red (Seguí 1991).

El análisis de redes permite plantear y resolver un gran número de problemas prácticos, como por ejemplo la determinación de rutas óptimas para vehículos que deben moverse por una red de carreteras, la localización de servicios o instalaciones de modo óptimo respecto a costes de recorrido para su empleo por los usuarios, la delimitación de distritos o áreas de influencia, la asignación de caminos de determinación de un producto a los almacenes existentes, etc.

## **2.2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE UN SISTEMA DE TRANSPORTE**

Aunque existen muy diversas definiciones de lo que entenderíamos por transporte, puesto que los objetivos que se persiguen, los agentes que interviene, las funciones que desempeña, etc., en cada actividad o situación son distintos, normalmente se considera transporte como el desplazamiento de personas o bienes utilizando medios espaciales, o como una compleja actividad económica la cual interviene de una manera directa en el desarrollo de un país facilitando la movilidad, o una manera de dotar de accesibilidad al territorio, etc. (Aymerich 1994).

Por lo tanto, no se puede limitar la definición a una actividad económica cuya misión es trasladar personas o mercancías a lo largo del territorio, puesto que no se trata de una mera actividad de distribución a través de las redes de transporte por las cuales se desplazan mercancías, materias primas, etc. No es únicamente así, sino que debemos destacar un papel fundamental que juegan las redes de transporte como es el de establecer relaciones espaciales entre unidades políticas o entre bloques económicos con intereses afines, es decir, se generan unos intereses políticos y estratégicos entre dichas unidades geográficamente alejadas (Ruíz 1998).

De modo que, algunos autores consideran el transporte como un sistema, e incluso como un subsistema que se encuentra inmerso en el sistema económico o territorial de un país, donde destacan tres elementos fundamentales: la infraestructura, el medio de transporte y la actividad o servicio propiamente dicho.

No obstante, las causas por las que se realiza dicha actividad económica son de diversa naturaleza, y además depende fundamentalmente del ámbito espacial que consideremos, del tipo de transporte utilizado, etc. De una manera más definida, se pueden establecer las principales funciones u objetivos del transporte, las cuales se enumeran a continuación:

- Permitir la conexión de los sectores productivos entre sí y con los centros de consumo
- Satisfacer las necesidades de desplazamiento de personas y mercancías
- Favorecer la cohesión económica y social



- Dotar de accesibilidad al territorio
- Contribuir a la unidad e integración de las regiones, así como la integración comunitaria a través de la interconexión de las redes nacionales
- Colaborar en la mejora de la calidad de vida, respetando el medioambiente
- Ser por sí misma una importante actividad económica dentro de un país para contribuir de una manera positiva en la creación del Producto Interior Bruto.
- Impulsar el desarrollo de otras actividades económicas

Podemos observar que estas funciones u objetivos se enmarcan dentro de las diferentes esferas de una sociedad, es decir, poseen un carácter económico, social, político o estratégico, sin establecerse en algunas ocasiones un límite definido.

También es importante resaltar que el transporte como un subsistema dentro de un sistema más extenso se interrelaciona a su vez con otros subsistemas de una manera más o menos directa. Por ejemplo podríamos citar la importancia del transporte con el desarrollo regional, con la economía nacional, con el sistema territorial, con el sistema económico, con la energía, con el sistema social, etc.

### ***2.3. INTRODUCCIÓN A LA LOGÍSTICA Y OPTIMIZACIÓN DEL TRANSPORTE***

La Logística puede considerarse como un proceso estratégico donde la empresa organiza y mantiene su actividad. Por ello, puede verse desde diferentes puntos de vista, tanto como sectores profesionales o disciplinas existan puesto que cualquiera de ellos mantiene algún tipo de relación con ella. En términos generales, la logística determina y gestiona los flujos de materiales y de información internos y externos tratando de optimizar la situación de oferta-demanda del mercado.

Concretamente, la Logística puede definirse como la ciencia que estudia cómo las mercancías, las personas o la información superan el tiempo y la distancia de forma eficiente (Robusté 2005). En este sentido, la logística puede entenderse como un envolvente natural del transporte, tanto de mercancías como de personas.

De un modo general, podemos decir que la logística incluye todas y cada una de las operaciones necesarias para mantener una actividad productiva, como por ejemplo: planificación de compras, servicio postventa, gestión de la producción, aprovisionamiento de materias primas, almacenaje, diseño de embalaje, clasificación, etiquetado, distribución, etc.

Estudios realizados en la década de los ochenta ponen de manifiesto la importancia de los costes logísticos para una empresa e incluso para un país. Se concluyó que entre un 31% y un 48% de los costes eran debidos al transporte, entre un 22% y un 34% eran debidos al almacenaje y entre un 24% y un 47% eran debidos al coste financiero de mantenimientos de stocks (Aymerich 1994).

En la última década, la Logística ha sufrido un proceso de desarrollo derivado de diversos motivos que pasamos a enumerar. En primera instancia, destacamos los cambios producidos en el ámbito socioeconómico como consecuencia de una modificación en las pautas de comportamiento social respecto a la calidad de vida,

calidad de servicios y exigencias medioambientales. Esto ha dado lugar a una modificación en la relación producción-consumo donde el sector productivo debe adaptarse a las exigencias del consumidor, hecho que conlleva a la alteración en la relación fabricantes-proveedores. Otro factor determinante ha sido la reorganización del sector productivo, con la finalidad de mejorar el servicio al cliente, y por ende aumentar la productividad, mediante la reducción de costes y adaptación del proceso de producción a las exigencias de la demanda. Como último factor, y no menos importante nos encontramos con un nuevo escenario del mercado interior europeo donde la liberalización, la internalización de actividades y su apertura hacia los países del este juegan un papel muy importante para el desarrollo de las prácticas de logísticas empresariales.

### ***2.3.1. Componentes y factores de decisión en Logística***

La función Logística, como ya se ha indicado, esta dirigida a optimizar objetivos globales, por lo que es conveniente establecer las funciones de cada parte integrante con objetivos prioritarios parciales. Los principales departamentos con los que se interrelaciona un departamento de logística son: Producción, Marketing, Comercial y Finanzas.

En Logística inciden varias áreas de decisión las cuales podríamos agrupar en: stocks/inventarios; instalaciones (almacenes y fábricas); comunicaciones; transporte; gestión de materiales, calendario de producción y unidades de carga. Llevar a cabo estrategias logísticas conlleva superar muchos problemas debido a la cantidad de variables que interrelacionan, las situaciones conflictivas que se presentan, el grado de complejidad en ocasiones de los algoritmos para resolver determinados problemas, etc.

Para abordar un problema en logística es necesario definir las metas y objetivos a alcanzar, es decir, definir la función objetivo la cual nos guiará hacia la solución optima. A continuación vamos a detallar algunos factores que influyen en la toma de decisiones en logística.

- Modo de transporte: valor y urgencia de los envíos, peso, volumen, localización de proveedores y clientes, costes relativos, fiabilidad, tiempo de transporte, etc.
- Empaquetado: valor y fragilidad de la mercancía, marketing, modulabilidad, estandarización de tamaños, peligrosidad, etc.
- Localización de almacenes: Ubicación de los clientes, accesibilidad local a la red de transportes, disponibilidad de mano de obra y suelo, costes, servicio, etc.
- Subcontratación del transporte: fluctuación estacional del tráfico, nivel de especialización de los vehículos, fiabilidad del subcontratista, etc.

### ***2.3.2. Progreso y evolución en el sector del transporte***

Como consecuencia de la desaparición de barreras físicas en Europa, una nueva cultura respecto a los sistemas de gestión e información especialmente en la producción, los avances tecnológicos, etc., propiciaron hace algunas décadas un gran cambio en el sector del transporte y la distribución, y en la industria en general.

El concepto de producción just-in-time<sup>3</sup>, el aumento del número de productos, los nuevos sistemas de gestión de la producción y los pedidos informatizados, la flexibilidad de las nuevas naves industriales para adaptar la producción a la demanda, las exigencias de calidad, seguridad y fiabilidad de los envíos, etc., forman un conjunto de factores determinantes en dicho cambio respecto a la terna distribución-transporte-almacenaje y unas nuevas relaciones entre cargadores-transportistas.

En este cambio, también es importante destacar que el nivel de servicio se convierte en el elemento de decisión básico, dejando en un segundo plano el criterio de coste. Pero además, las empresas productoras declinan su atención en la producción, ámbito que dominan, delegando el resto de funciones a otros especialistas. Por eso, las empresas de transporte, en este sentido, gozan de una posición privilegiada y tiene la posibilidad de prestar este servicio.

Los objetivos de la logística moderna se centraron, en la pasada década, principalmente en la eliminación de los stocks, los plazos de entrega, los defectos, las averías y en la gestión. Por estos motivos, surgieron una serie de estrategias logísticas, como son: Just in time (JIT), Total Quality Control (TQC) y Electronic Data Interchange (EDI).

### 2.3.3. *Componentes de un sistema de distribución física*

Una red de distribución física eficiente sirve un espacio bidimensional con una estructura jerárquica y no redundante apoyándose en terminales de consolidación<sup>4</sup> (Robusté 2005).

Un sistema de distribución física se compone principalmente de unas instalaciones fijas, unos vehículos y unos objetos o personas que deben ser distribuidos o transportados, cada uno de los cuales lleva asociado un coste. Aunque en el apartado 2.4 y 2.5 se explican más detalladamente los costes de transporte, aquí haremos una breve mención a éstos:

- Los vehículos: conllevan unos costes de operación y costes de parada que incluyen carga y descarga
- las instalaciones fijas: soportan el coste del espacio destinado al inventario, y a costes de carga y descarga del origen y del destino.
- Los objetos: llevan un coste asociado al inventario estacionario y otro coste al inventario en movimiento.

Las tarifas reales reflejan que a mayor tamaño de envío el coste unitario de transporte disminuye, y que el coste del envío es directamente proporcional a la distancia de transporte. También hay que mencionar las diferencias existentes entre el transporte mediante un vehículo lleno y un vehículo fraccionado.

---

3 El primero, JIT, se basa en conseguir una mayor productividad, eliminando pérdidas y exceso de inventarios, y producir en la cantidad, demanda y tiempo preciso.

4 Almacenes, lugares de transferencia

### 2.3.4. *Configuración de un sistema de distribución física*

A la hora de distribuir cualquier producto existen varias maneras de llevarlo a cabo, como por ejemplo utilizar vehículos llenos o fraccionados, almacenes intermedios o envíos directos, etc., con el objetivo primordial de minimizar los costes totales. Pero además la distribución de un producto depende del tipo de envío, es decir, puede ser de un origen a un destino, de uno a muchos e incluso de muchos a muchos.

El primer caso más simple, **de un origen a un destino**, la estrategia se limita a determinar el modo de transporte, la frecuencia y el tamaño del envío. Para clarificar este punto, supongamos un origen y un destino separados a una distancia o tiempo conocidos. Se dispone de vehículos con una determinada capacidad, que incurren en un coste promedio de transporte por envío de  $\gamma(\text{€})$ , donde  $\gamma = \beta + 2\alpha D$ , siendo  $D$  la distancia entre origen y destino, y el factor 2 indica la ida y el retorno en vacío;  $\alpha$  y  $\beta$  son parámetros de coste. El objetivo es encontrar el óptimo global del sistema, teniendo en cuenta los costes de transporte explícitamente y evaluar el tiempo de inventario como el tiempo empleado desde la producción hasta su consumo.

En el segundo caso, de un origen a muchos destinos, es interesante realizar las denominadas “zonas de reparto” que no es más que una partición de la región de servicio del almacén, las cuales se irán visitando de manera consecutiva. Este tipo de distribución puede ser de dos maneras, con transbordo y sin transbordo. En la primera, los factores que influyen en el problema son: el área de la región de servicio, la distribución geográfica de la demanda, la capacidad de los vehículos, el coste unitario de transporte y la distribución del flujo de la demanda, intervalo entre envíos consecutivos, el tamaño de los envíos y el área de la zona de reparto de cada vehículo. El otro caso, con transbordo, la cuestión de costes lógicos consta de tres partes: transporte de acceso, coste en la terminal y coste de distribución local. Los vehículos parten del origen con la carga completa y acceden sin realizar paradas a la zona de reparto asignada y visitando consecutivamente cada uno de los clientes. Para este tipo de estructura es conveniente la realización de rutas de reparto, según determinadas características de la zona de reparto asignada, tarea un tanto compleja.

La formulación clásica del diseño de rutas consiste en un programa matemático lineal con variables de decisión enteras, que son las que transfieren al problema una complejidad notable y dificultan enormemente la resolución de los algoritmos para tal fin, los denominados de solución de programas lineales. Estos programas intentan minimizar el coste total de la distribución, sumando las distribuciones de los costes unitarios de transporte, entre un cliente  $i$  y otro  $j$ , además de tener en cuenta las variables y parámetros de decisión que han de cumplir una serie de restricciones. Esta cuestión se trata con una considerable profundidad de detalle en el capítulo 3.

Debemos remarcar que un sistema de distribución física adecuadamente diseñado posee una serie de características imprescindibles, tales como: la segregación de rutas, estructura no redundante de la red, minimización de la longitud de los circuitos, descomposición de operaciones, terminales localizados en el centro de las áreas de influencia, etc. Sin embargo, cada situación debe plantear un estudio minucioso teniendo

en cuenta las particularidades de dicho sistema y desde un principio saber cual es la función objetivo que se desea optimizar.

#### **2.4. RELACIÓN INDUSTRIA-TRANSPORTE. COSTES DE TRASPORTE**

El concepto más general para la definición de coste es la valoración en términos monetarios en consumo de los diversos factores aplicados a un proceso productivo. Esta definición se encuentra subyugada principalmente a la naturaleza de estos factores. Estos factores pueden ser considerados desde distintos ámbitos, según se trate de una empresa, de un usuario, de una administración pública, etc. Por tanto, hay que tener en cuenta que existen diferentes clasificaciones de este concepto dependiendo de la cuantificación de los diferentes factores consumidos. A continuación se muestra una clasificación de los costes (Aymerich 1994).

**Costes por naturaleza.** Se basa en la información aportada por el sistema contable y agrupa los costes en base a su naturaleza: personal, consumos, financieros, servicios a terceros, amortizaciones, etc.

**Costes de explotación e infraestructura.** Se utiliza cuando existen dos personas jurídicas distintas en lo que refiere a la realización y a la explotación.

**Costes operativos directos e indirectos.** Son aquellos directamente relacionados con la producción de un servicio o bien (costes directos), y aquellos que solo se pueden imputar mediante ratios en el proceso productivo (costes indirectos)

**Costes fijos y variables.** Esta clasificación es muy utilizada por las empresas sobre todo a la hora de establecer políticas de precios. Dentro de la cadena de producción una serie de costes permanecen sensiblemente constantes aunque la producción varíe. Son los denominados costes fijos que se suelen asociar con las instalaciones, inmuebles y por una parte del personal. Por otra parte están los denominados costes variables los cuales oscilan de forma íntima según los niveles de producción, como pueden ser los combustibles, materias primas, personal eventual, etc.

**Costes de progresión y costes de regresión.** La curva de progresión se produce en momentos en los cuales el mercado es creciente y la empresa aumenta su nivel de capitalización mejorando su competitividad. Representado en la curva sería el lugar geométrico donde para cada nivel dado de producción y equipamiento corresponde los límites de capacidad (aumento de los costes variables). Por el contrario, la curva de regresión se produce en momentos de débil crecimiento en el mercado donde a iguales niveles de producción y equipamientos, los costes variables o fijos aumentan, de modo que esta curva no coincidirá con la de progresión.

**Costes a corto y a largo plazo.** Estos costes van asociados a una dimensión temporal. Los costes a largo plazo vendrán reflejados y se representan mediante los valores de los costes a corto plazo para cada nivel de producción.

**Costes incorporables y no incorporables.** Son costes que se generan fuera de la cadena productiva pero en ocasiones han de tenerse en cuenta como: costes de

ejercicios anteriores, costes de la cartea de valores, etc.

**Costes históricos y estándares.** Los costes históricos son los obtenidos a partir de datos reales y actualizados, y los costes estándares se calculan a priori, obteniendo así el proceso productivo más rentable.

**Costes conjuntos y comunes.** Los costes conjuntos se producen cuando un servicio o producción de un bien implica necesariamente la de otro. Los costes comunes, por el contrario no implican necesariamente la producción o servicio de los demás.

**Costes de actividad y subactividad.** Los costes de subactividad pueden medirse como el nivel de desocupación de una empresa en un determinado periodo, afectando en lo que se refiere al personal, instalaciones, equipos, etc., que no alcance el nivel de ocupación establecido,

**Costes para la colectividad.** En la mayoría de los casos, no todos los costes de un proceso productivo son soportados por la empresa prestataria del servicio. Por ello surgen los denominados “costes externos”, siendo estos la valoración en términos monetarios de un efecto externo negativo, pretendiendo imputar estos costes externos a quien los produce. Se suelen incluir los siguientes tipos de costes externos: costes de congestión, costes de los accidentes, costes del tiempo, costes del ruido, costes de la contaminación atmosférica y costes de la contaminación de las aguas, entre otros.

A continuación, se detalla la tipología de los costes para el transporte por carretera. En general, los costes son directamente proporcionales al radio de acción de la empresa. Cuando éste disminuye se observa una disminución en la capacidad de los vehículos utilizados y además los costes de personal aumentan considerablemente. Por el contrario, cuando el radio de acción aumenta se produce un dimensionamiento de la empresa y una tendencia a aumentar la capacidad de los vehículos de distribución, y por ende los gastos de amortización, los costes financieros y los seguros también se ven afectados. Sin embargo, se produce una reducción de costes a medida que crece la empresa debido principalmente a una obtención de mejores precios (en suministros y en los vehículos)

CLASIFICACIÓN TIPOLÓGICA DE LOS COSTES		
COSTES FIJOS	Conductos	Sueldo, seguridad social, absentismo
	Amortización	8 años camión y 10años remolque, valor residual de 18 y 11%
	Financieros	Sobre el 70% del valor total
	Seguros	Vehículos y mercancías (10% del vehiculo)
COSTES VARIABLES	Combustible	42 litros/100 Km
	Reparaciones	Un 70% del coste de amortización
	Neumáticos	Vida útil de 100.000 km
	Varios	Peajes, lavados, etc.
	Dietas	10% del coste total
Costes generales	Administración y estructura, 15% del resto de costes	
Beneficios	Coste de oportunidad, 5% del coste total	

Tabla 5. Clasificación de los costes fijos y costes variables

## 2.5. COSTES DE TRASPORTE EN LA GESTIÓN DE RECURSOS BIOMÁSICOS

### 2.5.1. Función de costes de transporte para la recogida de biomasa

La función de costes  $CB_i$  estima los costes de transporte totales para llevar al destino  $i$  toda la biomasa de los puntos  $j$  de origen. Esta función está compuesta por un término de costes fijos ( $CF$ ) y un término de costes variables dependientes de la distancia ( $CV$ ). Los costes asociados al tiempo invertido en transporte y operaciones de carga y descarga se incluyen en los costes variables y fijos respectivamente. Como podemos observar en la ecuación 1, el planteamiento es análogo a la expresión planteada en el apartado 2.3.4. según la función  $\gamma(\text{€})$ . La función de costes queda definida por la siguiente expresión:

$$CB_i(\text{€}) = CF * NV + CV(d) * \sum_i^i d_i$$

$$CF = CF_1 + CF_2$$

$$CV = CV_1 + CV_2$$

$$CB_i \text{ compactada}(\text{€}) = 127 * NV + 2.05 * \sum_i^n d \quad \text{Ec. 1}$$

$$CB_i \text{ a granel}(\text{€}) = 41 * NV + 1.5 * \sum_i^n d \quad \text{Ec. 2}$$

donde,

$CF$  representa la suma de los Costes Fijos de tipo 1 y 2.

$NV$  es el número total de viajes necesarios para trasladar la biomasa desde el punto  $i$  hasta la ubicación de la planta, distinguiendo entre compactada o a granel.

$CV$  representa los Costes Variables que depende de la distancia, considerándola ésta únicamente de ida.

$\sum d_i$  representa la distancia total recorrida para transportar toda la biomasa del área de actuación hasta el lugar  $i$ , utilizando para ello las vías de comunicación y por consiguiente teniendo en cuenta las características de las mismas.

Los costes fijos unitarios  $CF_1$  están asociados a las operaciones de carga y descarga en las que se consume tiempo, recursos humanos y combustible.

Los costes fijos unitarios  $CF_2$  están asociados a la compactación previa al transporte en caso de utilizarse, en caso contrario  $CF_2 = 0$ . Los costes de personal y combustible de este proceso se calcularán para una carga completa de la unidad de transporte.

Los costes variables asociados a la distancia total recorrida para llevar toda la biomasa al punto  $i$ , son los debidos al combustible consumido, recursos humanos y mantenimiento del vehículo.

Las funciones de costes consideradas se muestran en las siguientes tablas resumen:

<b>FUNCIONES DE COSTE</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
FCS (Función de Coste Sin compactación)	Coste de recogida y transporte sin previa compactación, UT = 3 t
FCC (Función de Coste Con compactación)	Coste de recogida y transporte con compactación previa, UT = 10 t

**Tabla 6. Descripción de la unidad de transporte (UT), en la recogida de la biomasa**

Los índices de coste genéricos utilizados para calcular los costes de personal y combustible son los siguientes:

<b>CONCEPTO</b>	<b>CONSIDERACIONES ECONÓMICAS</b>
Consumo combustible	35 l / 100 km , coste del combustible 1 €/l
Costes de personal	12 €/h
Reparaciones y mantenimiento	0,1 €/km

**Tabla 7. Repercusión en el costes de transporte del personal y del combustibles**

Las consideraciones realizadas en cada función de costes son las siguientes:

**A) Recogida sin compactación**

<b>COSTE CARGA/DESCARGA</b>		
Tiempo de carga + descarga	3	h
Personal	1	personas
Combustible	5	litros fuel
<b>COSTE FIJO CF1</b>	41	€/viaje

<b>COSTE COMPACTACIÓN</b>		
No se utiliza compactadora		
<b>COSTE FIJO CF2</b>	0	€/viaje

<b>COSTE POR KM</b>	
Transporte camión	
40 km/h (velocidad media) 1 €/litro (consumo) 0,025 h/km (conductor)	Reparaciones y mantenimiento 0,1€/km
<b>Coste variable, CD(distancia ida y vuelta)</b>	1,5x km

**Tabla 8. Consideraciones para obtener la Función de Coste sin compactación**



**B) Recogida con compactación**

<b>COSTE CARGA/DESCARGA</b>		
Tiempo de carga + descarga	3	h
Personal	1	personas
Combustible	5	litros fuel
<b>COSTE FIJO CF1 (ida y vuelta)</b>	41	€/viaje
<b>COSTE COMPACTACIÓN</b>		
Velocidad producción balas	4	t/h
Consumo fuel	10	l/h
Carga unidad de transporte	10	t
Personal	2	personas
<b>COSTE FIJO CF2 (ida y vuelta)</b>	85	€/viaje

<b>COSTE POR KM</b>		
Transporte camión		
40	km/h (v. med.)	Reparaciones y mantenimiento
1	€/l (consumo)	0,1 €/km
0,025	h/km (conductor)	
Coste variable, (ida y vuelta)		1,5 x km

<b>COSTE POR KM</b>		
Transporte compactadora		
40	km/h (v. med.)	Reparaciones y mantenimiento
1	€/l (consumo)	0,1 €/km
0,025	h/km (conductor)	
Compactadora recorre..... 4 veces menos distancia que camión (1 viaje al día para llenar aproximadamente 4 camiones)		
Coste variable, CD (ida y vuelta)		0,525

**Tabla 9. Consideraciones para obtener la función de Coste con compactación.**  
Fuente: (BIOVAL, 2008)

**2.6. REPRESENTACIÓN DIGITAL DE REDES DE TRANSPORTE**

Las características espaciales de una red se pueden representar digitalmente mediante dos tipos de información; por un lado la localización de los nudos de una red mediante

las coordenadas X e Y de cada uno de ellos, por otro, los aspectos topológicos o de relación de la red. Para representar este último se suelen describir las aristas de la red, según su nodo origen y su nodo destino como se muestra en la Figura 8, y a la arista se le añade la longitud en cualquier tipo de unidades, distancia, tiempos de recorridos, etc.

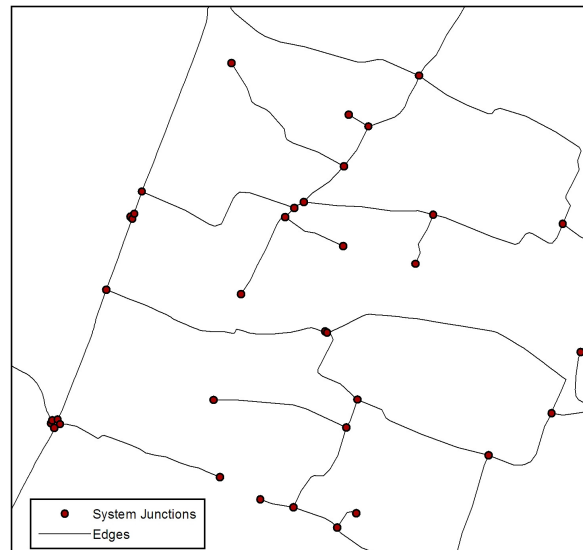


Figura 8. Ejemplo de la representación de redes digitales (nudos y aristas)

Como se ha indicado anteriormente, la información temática puede ser referida tanto a los nudos como a las aristas. En el caso de los nudos, la principal cuestión es asignarles un indicador. En el caso de las aristas es un poco más complejo, puesto que en muchas ocasiones las variables de cada uno de los tramos no tienen valores uniformes. En estos casos hay que identificar donde se encuentran estas diferencias temáticas de las variables.

Una primera aproximación al estudio de una red es la descripción y conocimiento de sus elementos líneas, tanto de una manera simple como simultánea de todas las aristas o nudos que la forman. Veamos brevemente estos elementos.

**Longitud de una línea.** Cuando la arista que se pretende calcular la longitud es recta, se utiliza la distancia euclídea para, a partir de las coordenadas de sus nudos (de origen y final), determinar su longitud. Como un segmento recto está definido por dos vértices (A y B), a partir de sus coordenadas se calcula la distancia que los separa.

Si la arista no es recta, la aproximación se realiza mediante una serie de segmentos rectos y su longitud se halla sumando la longitud de cada uno de los segmentos que la constituyen.

En otras ocasiones es más útil emplear en lugar de una función de distancia matemática, una función más usual y práctica de distancia: “el coste de recorrer la separación de A y B. Estos costes se miden en unidades tales como: pesetas, tiempo, esfuerzo físico, etc. El coste de ir de un punto a otro no suele ser el mismo en ambos sentidos.

Además, un concepto relacionado con el de distancia es el de *proximidad*: distancia desde cada objeto geográfico existente en un mapa a un lugar/objeto de referencia o destino. Esto puede ser representado mediante lo que se denomina mapa de proximidad de toda una región respecto a uno o varios lugares de referencia.

Los siguientes índices nos describen de una manera cuantitativa en cierto modo las características de una red, así como posibilitan la comparación entre redes y determinar cual es la más densa, o tramos más largos, etc.

### **Razón de sinuosidad**

La representación de una red supone un proceso de abstracción y de simplificación de la realidad. Este proceso hace que redes muy complejas con aristas curvas, se simplifiquen en el grafo utilizando tramos rectos. Por este motivo se utiliza la razón de sinuosidad, que responde a la expresión:  $S = \text{Longitud real} / \text{longitud en línea recta}$ . El valor que se obtiene es adimensional, y cuanto mayor es el valor obtenido, más tortuosa es la red.

### **Cohesión topológica de una red**

La cohesión es otra de las características de la red donde se estudia de una manera simultánea todas las aristas y nudos que la forman. De modo que el movimiento de flujos a través de una red se determina por un lado por la longitud de las aristas que la forman, y por otro el número de interconexiones que existen en la red. El número de aristas de una red en relación al número de nudos que existen define una medida de conectividad o cohesión de la red, es decir, el grado de interconexión del circuito. Para ello, se han elaborado diferentes medidas de la conectividad/cohesión tales como: el índice beta, el Índice Gamma y el Número ciclomático M (Bosque 2004).

El *Índice Beta* se define como la relación entre el número de aristas de la red ( $l$ ) y el número de nudos ( $n$ ), cuyo valor oscila entre 0 y 1, siendo cero una red nula. El número máximo de aristas para  $n$  nudos de la red se calcula mediante la expresión:  $n*(n-1)/2$ .

El *Índice Gamma* consiste en la relación entre el número de aristas existentes ( $l$ ) y el número máximo que puede existir, dados los nudos que forman esa red, calculándose a partir de la ecuación:  $l/(n*(n-1)/2)$ . El índice varía entre 0 para una red nula, es decir, sin ningún arco y 1 para un grafo completo.

El *Número Ciclomático* se calcula a partir de la expresión:  $l - (n - 1) - g$ , siendo  $g$  el número de grafos inconexos que aparecen en la red, es decir, aquellos nudos y aristas separados totalmente del resto de la red.

## **2.7. DETERMINACIÓN DE LAS DISTANCIAS Y RECORRIDOS**

Es frecuente en el estudio de una red de comunicaciones, y más aún en la parte práctica que se desee determinar el camino más corto entre un nodo origen y un nodo destino, a través de las aristas que la forman, por lo que la distancia euclídea (en línea recta) debe ser descartada. De modo que, el problema se reduce en encontrar todos los posibles itinerarios desde el nudo origen al nudo destino recorriendo menor distancia. Esta es una cuestión crucial en el análisis de redes, y a lo largo de los tiempos se han desarrollado diversos algoritmos de cálculo para resolver este problema. Uno de los más utilizados fue ideado por Dijkstra basado en un procedimiento heurístico (prueba y error)

empleando todos los caminos posibles desde un nudo concreto hasta el destino, encontrando el más corto.

Íntimamente relacionado con lo anterior, es determinar el *camino óptimo*, que es una cuestión de gran utilidad práctica en muchos ámbitos y que se resuelve por el mismo algoritmo de Dijkstra conservando la lista de puntos y líneas atravesadas que minimizan la distancia recorrida, mostrándose tanto gráfica como tabularmente los resultados.

Respecto a las medidas de accesibilidad topológica, debemos decir, que están íntimamente relacionadas con la cohesión de una red, determinando la mayor o menor cantidad de aristas y nudos que es necesario atravesar para llegar al nudo de referencia desde alguno de los restantes.

Para calcular dicha accesibilidad se emplea el “número asociado de un nodo”, esto es el número mínimo de aristas que es necesario recorrer para unirlo con el nudo más distante. Para ello es necesario utilizar la denominada “matriz de conectividad de la red” y conocer las medidas de la accesibilidad a instalaciones/actividades localizadas en la red (Bosque 2004).

## **2.8. COCLUSIONES DEL CAPÍTULO**

El análisis de redes permite plantear y resolver un gran número de problemas prácticos, como por ejemplo la determinación de rutas óptimas para vehículos que deben moverse por una red de carreteras, la localización de servicios o instalaciones de modo óptimo respecto a costes de recorrido para su empleo por los usuarios, la delimitación de distritos o áreas de influencia, la asignación de caminos de determinación de un producto a los almacenes existentes, etc.

El concepto de transporte no puede limitarse a la infraestructura en sí misma, sino que se trata de una idea más amplia como es la de establecer relaciones espaciales entre unidades políticas o entre bloques económicos con intereses afines. Es por tanto que se consideran tres elementos fundamentales: la infraestructura, el medio de transporte y la actividad o servicio propiamente dicho.

La logística es una parte fundamental del transporte, tanto de mercancías como de personas, que incluye un gran número de operaciones y factores a tener en cuenta para alcanzar una actividad productiva satisfactoria. Es por ello que la logística esta en continuo avance y modernización, adaptándose a los cambios que se producen en el mercado, nacional e internacional.

La distribución de un producto depende de diversos factores, como el tipo de envío o el tipo de vehículo. Dependiendo del tipo de distribución física empleada, estudiando cada caso minuciosamente, se establece una función objetivo a optimizar mediante programación lineal. Es el caso de la función de costes de biomasa, donde minimizando las distancias totales alcanzamos el coste mínimo (ver capítulo 5).

---

### **CAPÍTULO 3.**

## **INTRODUCCIÓN A LA PROGRAMACIÓN LINEAL Y A LA TEORÍA DE LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE INSTALACIONES**

---

*La programación lineal se ha utilizado en un gran número de disciplinas desde que su precursor G. Dantzig, en el contexto de la Segunda Guerra Mundial, la ideó y aplicó en el ámbito militar. En este capítulo revisamos algunos aspectos de la teoría de la programación lineal, así como también un número de problemas que se tratan frecuentemente en análisis de localización, como el problema del transporte o el problema del camino más corto. En la segunda parte del capítulo se analizan un número elevado de modelos de localización que no podrían ser enunciados ni posteriormente resueltos sin utilizar para ello la programación lineal.*



### **3.1. INTRODUCCIÓN A LA PROGRAMACIÓN LINEAL Y ALGORITMOS DE CÁLCULO PARA RESOLUCIÓN DE MODELOS Y OTROS PROBLEMAS**

#### **3.1.1. Introducción**

Uno de los precursores en el amplio campo de la programación lineal fue G. Dantzig, originándose ésta oficialmente en 1947, pocos años después de la Segunda Guerra Mundial (1941 – 1945), tras su experiencia en métodos de planificación y programas logísticos en el Pentágono (Air Force, Estados Unidos). Es por el uso común en la jerga militar de la palabra “programa” refiriéndose a proyectos, que surge la actualmente conocida Programación Lineal, y generalizando la Programación Matemática.

Además de la experiencia vital en el Pentágono, Dantzig fue influenciado por los trabajos de otros autores de la época como Leontief (1932) destacando su modelo económico de entrada-salida y Von Neuman (1928) sobre teoría de Juegos y otro también relevante sobre el crecimiento económico en 1937. Previo a las contribuciones realizadas por Dantzig, no se conocían trabajos similares considerando una función objetivo a optimizar en el modelo matemático, salvo algunos trabajos muy superficiales formulados por Fourier en 1832 y Poussin en 1911. También, destacar una de las más importantes contribuciones para la programación lineal por el mismo autor, como fue la de idear el Método Simplex, comúnmente utilizado para resolver sistemas lineales complejos obteniendo la solución óptima.

Es con la aparición de los ordenadores a finales de los años 40 en este campo cuando comienza a desarrollarse vertiginosamente la programación lineal, considerándolos como una herramienta fundamental para la mecanización del proceso de planificación, además de las grandes aportaciones de matemáticos teóricos y economistas del momento. A partir de los años cincuenta, muchas áreas comienzan a emplear la programación lineal y de este modo emergen nuevas líneas de investigación y subcampos, jugando un papel importante para su desarrollo. Podemos citar la aparición de la Programación No Lineal con los estudios de Harold KuhnTucker, Ragnar Frisch y otros. Aplicaciones comerciales principalmente en el área petrolífera para la producción de gasolina llevadas a cabo por Cooper, Charnes y Mellon en 1952. En 1954 W. Orchard-Hays de la Rand Corporation escribe el primer software para resolución de problemas de programación lineal. A principios de los cincuenta también se inicia la Teoría de Flujos en Redes por M. Flood, conectándose con los trabajos de Hoffman y Kuhn en 1956 sobre la teoría de Grafos. La programación estocástica se inicio en 1955 por G. Dantzig y fue extendida en los años sucesivos por A. Charnes y W. Cooper, para tratar problemas con incertidumbres. En 1958 con el trabajo de R. Gomory empieza la Programación Entera con la generación automática de cortes de planos, y junto a ésta se comenzaron a desarrollar algoritmos para resolver dichos problemas, como el conocido Branch and bound (ramificación y acotación). En 1959 G. Dantzig y P. Wolf desarrollaron el principio de descomposición, que fue el inicio de los métodos a gran escala y cuya forma dual fue analizada por Bender en 1962, y aplicada por primera vez a la programación entera mixta (Dantzig 1997; Salazar González 2001).

La década de los cincuenta se convirtió en la etapa de oro para el desarrollo de la programación lineal, manteniendo en los años 60 y 70 un carácter más teórico y menos

aplicado ralentizando el proceso. En esta etapa destacamos los trabajos de R. Cottle y G. Dantzig (1963) sobre la teoría del pivote complementario, así como a mitad de los sesenta el enfoque convexo de estos problemas por Lemke. A finales de los 70, el matemático ruso L.G. Khachian desarrolló el algoritmo de Tiempo Polinomial para resolver problemas de programación lineal, siendo mejorado con el algoritmo de karmarkar en 1984.

En la actualidad, la aplicación de la programación lineal (en sus distintas variantes, sobre todo la entera) gracias a modernos algoritmos de relajación, otros heurísticos y algoritmos híbridos, así como a los avances en lenguajes de programación y en la informática (tecnologías de ordenadores), ha incrementado su campo de acción. Estas aplicaciones se extienden al campo de la logística, el transporte, la planificación de la producción, las finanzas, las comunicaciones, la biología molecular, etc. Mirando hacia el futuro, prometedores desarrollos se esperan en el campo de la programación no lineal entera y en la programación estocástica, con el afán de acercarnos cada vez más al concepto de que “El Mundo no es lineal y estocástico” (Salazar González 2001).

De modo que, para afrontar situaciones prácticas de gran complejidad y alcanzar los objetivos empleamos diferentes herramientas en el contexto de la programación lineal: los modelos mediante los cuales se formula el problema en términos matemáticos, los algoritmos para resolver el modelo planteado, y el software (basado en teoría matemática) que ejecuta los algoritmos en ordenadores para obtener la solución.

### ***3.1.2. Consideraciones generales de la programación lineal***

#### ***3.1.2.1. Conceptos básicos y formulación***

Como hemos apuntado anteriormente, la programación Lineal es una parte concreta del concepto general conocido como Programación Matemática, definida como:

La Programación Matemática (o Teoría de la optimización) es una rama de la Matemática Aplicada que trata técnicas para maximizar o minimizar una función objetivo sujeta a condiciones lineales, no lineales y enteras en las variables. Tiene como finalidad resolver problemas de decisión donde se desea optimizar un determinado objetivo, teniendo en cuenta ciertas limitaciones de los recursos disponibles.

A su vez, la programación matemática se divide en varias ramas dependiendo de las características del modelo matemático, principalmente diferenciando entre la Programación Lineal, cuando sus ecuaciones/inecuaciones son lineales en sus variables, y cuando no los son, denominándose entonces Programación No Lineal. En este último grupo existen diversos tipos de modelos interesantes como el caso de la Programación Entera (cuando las variables son valores enteros) opuesta a la Programación Continua (donde las variables asumen valores reales). Además, cuando por lo menos alguna de las ecuaciones/inecuaciones son cuadráticas, hablamos de Programación Cuadrática, y en el caso de que la función objetivo sea una función vectorial se le denomina Programación Multiobjetivo. La Programación Determinista cuenta con valores fijos en sus parámetros, contrariamente a la Programación Estocástica donde los parámetros son variables aleatorias. Y, por último, podemos mencionar la Programación paramétrica cuando los



parámetros varían de forma sistemática, buscando las soluciones óptimas en cada variación.

Otra rama de la Programación Matemática caracterizada por resolver problemas de optimización con un número finito de soluciones factibles es la Optimización Combinatoria. Esta aborda un extenso número de problemas polinomiales<sup>5</sup>, sobre todo en problemas de flujos sobre redes, y los problemas de optimización NP-duros<sup>6</sup> (son problemas para los cuales actualmente no existe un algoritmo de tiempo polinomial). Para conocer la complejidad en la resolución de estos problemas se introduce una función-indicador del total de operaciones que se deben ejecutar para resolverlo, del tipo  $O(f(N))$ , es decir, un procedimiento puede llevar un tiempo polinómico de resolución  $O(N)$ ,  $O(N^2)$ ,  $O(N^3)$ , etc. Podemos enunciar entonces que los problemas denominados de la clase  $P$  son aquellos para los cuales existe un algoritmo que lo resuelva en tiempo polinómico de manera eficiente. No obstante, muchos problemas de localización pertenecen a un grupo en el cual no existe algoritmo en tiempo polinómico que los resuelva de manera exacta y siendo críticos a la hora de resolverlos, conocidos como los *NP-completos*.

Algunos ejemplo de estos son el problema del árbol generador con coste mínimo, el problema del transporte, el problema del camino de coste mínimo, el problema del Flujo Máximo, el problema del viajante de comercio, el problema del árbol de Steiner, etc. Además de las mencionadas anteriormente, existen otras ramas que también merecen mención como la programación Dinámica, la Programación Lógica, la Programación por Restricciones, la Programación Semi-Definida, etc.

El caso especial de la  $P$ . Matemática es la Programación Lineal, definiéndola como:

La Programación Lineal consiste en la maximización o minimización de una función objetivo lineal en sus variables sujeta a condiciones de igualdad y desigualdad. En términos matemáticos, un problema de programación lineal queda definido por:

Las *variables del problema*, denominadas variables instrumentales. Comúnmente, se denotan por  $x_i$  o el vector  $X$ , y necesariamente han de tomar valores mayores o iguales que cero.

Una *función objetivo* que representa matemáticamente, el objetivo final a conseguir, denotada como  $Z$ , también lineal.

---

<sup>5</sup> Un problema se dice polinomial (o fácil) si se conoce un algoritmo polinomial para determinar una solución óptima.

Un algoritmo se dice polinomial si su orden de crecimiento  $O(\cdot)$  está acotado por un polinomio en  $n$  (sin importar el grado de dicho polinomio), esto es, es del tipo  $O(n^k)$  para algún número natural  $k$ . Como ejemplos se puede mencionar el algoritmo de Euclides para el calculo del común divisor de dos números o determinados algoritmos para invertir matrices  $m \times m$  (Salazar González, J. J. (2001). *Programación Matemática*, Madrid.).

<sup>6</sup> Son problemas de optimización asociados con problemas decisionales NP-completos (un problema se considera decisional si su respuesta es “si” o “no”). También podemos definir la clase NP (Nondeterministic Polynomial) si toda instancia con respuesta “si” admite un certificado polinomial, es decir, verifica la exactitud de la respuesta del problema mediante un algoritmo de tiempo polinomial.

Un *conjunto de valores K* (o conjunto de oportunidades), que satisfacen todas las condiciones del problema que se trata de resolver. Éstas también son lineales.

**Formulación matemática.** En su forma estándar, cuando las restricciones son igualdades, la definición matemática es encontrar los valores de  $x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_n \geq 0$  y minimizar la función objetivo  $Z$ , satisfaciendo:

$$c_1 x_1 + c_2 x_2 + \dots + c_n x_n = Z \quad (\text{Min})$$

$$a_{11} x_1 + a_{12} x_2 + \dots + a_{1n} x_n = b_1$$

$$a_{21} x_1 + a_{22} x_2 + \dots + a_{2n} x_n = b_2$$

$$\vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots$$

$$a_{m1} x_1 + a_{m2} x_2 + \dots + a_{mn} x_n = b_m$$

En notación matricial escribiríamos:

$$\begin{array}{ll} \text{Minimizar} & c^T x = Z \\ \text{sujeto a} & Ax = b \quad A : mxn \\ & x \geq 0 \end{array}$$

En su forma canónica, cuando las restricciones son desigualdades de alguna de las maneras siguientes (en notación matricial):

$$\begin{array}{ll} \text{Minimizar} & c^T x = Z \\ \text{sujeto a} & Ax \leq b \quad \text{ó} \quad Ax \geq b \quad A : mxn \\ & x \geq 0 \end{array}$$

En forma mixta, cuando existen unas restricciones como desigualdades, tanto mayor igual como menor igual, y otras como igualdades.

Como anteriormente hemos comentado, cada situación de la realidad es susceptible de ser modelada, proponiendo para ello un modelo matemático, como punto inicial para intentar afrontar su resolución mediante programación matemática, de la forma:

$$\text{Min } Z = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad \quad \text{Max } Z = \text{Min}(-Z)$$

$$\begin{array}{ll} \text{sujeto a} & \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq, =, \geq b_i \quad \forall i = 1, \dots, m \\ & x_j \geq 0 \quad \forall j = 1, \dots, n \end{array}$$

donde,

$n$  representa el número de variables;

$m$  es el número de restricciones;

$x_j$  ( $j=1, \dots, n$ ) son las variables de decisión del problema;

$a_{ij}$ ,  $b_i$ ,  $c_j$  ( $i=1, \dots, m$ ;  $j=1, \dots, n$ ) son número reales dados, es decir, los parámetros del modelo. Al número  $c_j$  se le denomina costo asociado a al variable  $j$ -ésima y al  $b_i$  se le llama recurso asociado a la restricción  $i$ -ésima.

Un concepto clave en cualquier tipo de programación es el *Modelo Matemático*. Como ya sabemos, los modelos son representaciones simplificadas de la realidad, mostrando la interrelación entre objetos. Los elementos de la realidad se convierten en *variables* en el modelo y las *ecuaciones/inecuaciones* se comportan como limitaciones de los recursos. Esta equivalencia entre la realidad y su imagen matemática lleva intrínseca una distorsión, por lo que es necesario llevar a cabo un proceso de validación. Resumiendo, el proceso de modelización se compone de las siguientes fases: 1) Análisis del problema, 2) Construcción del modelo (formulación), 3) Análisis del modelo, 4) Solución numérica (desarrollar algoritmos de resolución), y 5) Validación del modelo (Salazar González 2001).

Existen numerosos ejemplos concretos en los cuales puede ser de aplicación la programación lineal (continua o entera) y, a su vez, cada uno de ellos le pueden ser asociados diferentes modelos, pudiendo ser algunos de ellos más eficiente que otros en la práctica. En su libro, Juan José Salazar (Salazar González 2001) presenta más de una treintena de aplicaciones en muy diversos contextos, planteando los modelos matemáticos en cada caso y las técnicas algorítmicas comúnmente empleadas para resolverlos. A continuación, mostramos un ejemplo sencillo del autor para clarificar algunos conceptos previos, siguiendo con el modo natural de construir un modelo de programación lineal: 1) Definición de variables de decisión, 2) Definición de las clases de objetos y sus unidades y 3) Establecer las restricciones en forma de ecuaciones y la función objetivo.

*Problema 1.* Un comedor desea diseñar para sus comensales a costo mínimo pero proporcionando 2000 kilocalorías de energía, 55 gramos de proteína y 800 miligramos de calcio. Para ello disponemos de los siguientes productos con sus características. Además se precisa que en el menú propuesto no se incluyan más de 4 unidades de pan, ni más de 3 de pollo, ni más de 2 huevos, ni más de 8 de leche, ni más de 2 de tarta, ni más de 2 de papas con carne.

PRODUCTO	TAMAÑO	ENERGÍA	PROTEÍNA	CALCIO	PRECIO
Pan	28 g	110	4	2	10
Pollo	100 g	105	32	12	85
Huevo	2 u	160	13	54	30
Leche	237 cm <sup>3</sup>	160	8	285	20
Tarta fresa	170 g	420	4	22	75
Papas	260 g	260	14	80	72

- Planteamos el modelo matemático -

Variables a considerar:

- $x_1$  = cantidad de pan a consumir en la dieta óptima
- $x_2$  = cantidad de pollo a consumir en la dieta óptima
- $x_3$  = cantidad de huevo a consumir en la dieta óptima
- $x_4$  = cantidad de leche a consumir en la dieta óptima
- $x_5$  = cantidad de tarta de fresa a consumir en la dieta óptima
- $x_6$  = cantidad de papas con carne a consumir en la dieta óptima

Función Objetivo y condiciones:

$$\begin{aligned}
 \text{Minimizar} \quad & 10x_1 + 85x_2 + 30x_3 + 20x_4 + 75x_5 + 72x_6 + \\
 & 110x_1 + 205x_2 + 160x_3 + 160x_4 + 420x_5 + 260x_6 \geq 2000 \\
 & 4x_1 + 32x_2 + 13x_3 + 8x_4 + 4x_5 + 14x_6 \geq 55 \\
 & 2x_1 + 12x_2 + 54x_3 + 285x_4 + 22x_5 + 80x_6 \geq 800 \\
 & x_1 \leq 4 \\
 & \quad x_2 \leq 3 \\
 & \quad \quad x_3 \leq 2 \\
 & \quad \quad \quad x_4 \leq 8 \\
 & \quad \quad \quad \quad x_5 \leq 2 \\
 & \quad \quad \quad \quad \quad x_6 \leq 2 \\
 & x_1, \quad x_2, \quad x_3, \quad x_4, \quad x_5, \quad x_6 \geq 0
 \end{aligned}$$

La última fila de restricciones representa la condición de integridad, exigiendo que todos los valores deberán ser necesariamente valores enteros, resultando en este caso un modelo de Programación Lineal Entera.

Para una mayor comprensión de los siguientes apartados de este capítulo se hace necesaria la definición de algunos conceptos. En los problemas de optimización se plantea la búsqueda de una solución óptima (si existe) del conjunto de las variables.

Se llama *Solución Factible* o vector admisible de un problema de programación lineal a cualquier valor de  $X$  que satisface las restricciones  $AX = B$  y  $X \geq 0$ , refiriéndonos a la forma estándar, es decir, que la solución esté contenida dentro del conjunto convexo<sup>7</sup> de oportunidades.

La *Solución Factible Óptima* es aquel o aquellos vectores admisibles para los que la función objetivo alcanza el óptimo (mayor o menor valor). Esta solución no tiene porque ser única, pueden existir infinitas soluciones, así que se denomina *Región Factible* de un

---

<sup>7</sup> El conjunto de oportunidades queda definido por la intersección de las restricciones, que al tratarse de desigualdades lineales delimitan semi-espacios cerrados. Por lo tanto, al ser intersección de conjuntos convexos, el conjunto de oportunidades es también convexo. La función objetivo, por tratarse de una función lineal puede ser considerada como cóncava o convexa.

problema lineal al conjunto de todas las soluciones. En la resolución gráfica correspondería con un poliedro no vacío, siendo el vector solución el punto de tangencia (vértice del poliedro) entre el hiperplano de la función objetivo y el conjunto de soluciones (o conjunto de oportunidades) (Mocholi 1984; Salazar González 2001). Resolver un problema geoméricamente solo es viable cuando el número de variables es muy pequeño, en todos los demás casos se recurre a algoritmos matemáticos, como veremos en los siguientes apartados.

*Definición solución Básica.* Se le llama solución básica a la solución especial obtenida por asignar las variables independientes (no básicas) el valor cero y resolver para las variables dependientes (o básicas, que coinciden con  $m$ , número de restricciones).

*Definición solución Básica factible.* Es una solución básica en la cual toda  $x_j \geq 0$

*Definición solución Óptima.* Es una solución básica factible que optimiza la función objetivo del problema.

*Definición Forma canónica.* Un sistema de  $m$  ecuaciones y en  $n$  variable  $x_j$  se dice que está en forma canónica con respecto a un conjunto de variables  $(x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jm})$  si y solo si  $x_{ji}$  tiene un coeficiente unitario en la ecuación  $i$  y coeficientes nulos en el resto de ecuaciones.

### 3.1.2.2. El Método Simplex

El método Simplex, ideado por Dantzig en 1945 tuvo una gran aceptación en la resolución de problemas de programación lineal debido a la facilidad de modelar problemas de decisión en diversas áreas, y por obtener soluciones en un tiempo razonable. Este método está dividido en dos fases. La primera fase busca la solución básica factible (inicial), si existe, introduciendo para ello variables no negativas (artificiales) y transformando el problema a su forma canónica, para en la segunda fase buscar la solución factible básica óptima.

El algoritmo Simplex se basa en la resolución de sistemas de ecuaciones lineales mediante el procedimiento de Gauss-Jordan. Se trata de un algoritmo iterativo, y como tal necesita de un punto de partida que es la denominada *Solución factible básica inicial* (punto extremo inicial). Básicamente, el procedimiento consistiría en, una vez determinada cualquier solución básica, obtener una solución posible mínima en un número finito de iteraciones. En estas iteraciones, se pretende encontrar una nueva solución posible cuyo valor correspondiente de la función objetivo sea menor que el valor de la precedente. Este proceso continúa hasta que se alcanza una solución mínima.

Los pasos necesarios para llevar a cabo el método simplex serían los siguientes:

*Inicialización de la fase I.* El objetivo será reemplazar la función objetivo  $Z$  por un nuevo objetivo artificial,  $w$ , que será la suma de las variables artificiales. Utilizar el algoritmo del Simplex (secuencia de operaciones de pivoteo para llegar a la forma canónica) para encontrar la solución que minimice la suma de la variable artificial  $w$ , es decir, llevar la



con  $x_B = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$  y  $x_N = (x_{m+1}, \dots, x_n)^T$ . Entonces la solución básica correspondiente es  $x_B = \bar{b}$  y  $x_N = 0$ , es decir,

$$x_1 = \bar{b}_1, x_2 = \bar{b}_2, \dots, x_m = \bar{b}_m; \quad x_{m+1} = x_{m+2} = \dots = x_n = 0; \quad z = \bar{z}_0$$

*Inicialización de la fase II.* Esta fase se inicializa cuando  $w=0$ , es decir, se ha llegado a la solución factible básica y debe introducirse la forma lineal  $Z$ , con sus variables básicas no artificiales. Aplicar el algoritmo Simplex a la forma canónica obtenida e iterar hasta encontrar una solución que minimicen los valores de  $Z$ .

Normalmente este método se estructura en forma de tabla, para mostrar las soluciones que se van obteniendo en forma tabular (tabla simples) (Dantzig 1997; Tormos 2003). El sistema puede ser representado mediante la Tabla 10 de números:

x	-Z	RHS (right hand side)
A	0	b
$c^T$	1	0

**Tabla 10. Estructuración en tabla del método simplex**

La tabla se va actualizando según van realizándose las operaciones de pivotaje con el objetivo de:

- conseguir la matriz identidad bajo las variables básicas,
- conseguir el coste relativo nulo para las variables básicas.

Únicamente mencionar que existe el denominado Método Simplex Revisado que consiste en una versión de este procedimiento que trata de reducir la cantidad de cálculos a realizar en cada iteración. Sobre todo éste es eficaz cuando el problema lineal está caracterizado por un gran número de columnas (Salazar González 2001).

### 3.1.3. *El problema del transporte (The transportation problem)*

El problema clásico del transporte fue estudiado por Hitchcock (1941) a principio de los años cuarenta, el cual propuso un método de resolución que tiene puntos en común con el conocido método simplex.

El problema catalogado como “Problema del Transporte” surge cuando el objetivo es minimizar el coste de transporte a partir de la selección de caminos específicos desde el proveedor hasta el cliente (Sule 2001), determinando la cantidad que debe ser transportada desde cada proveedor a cada cliente.

Existen gran cantidad de áreas donde es comúnmente conocido este problema, desde el planeamiento financiero, ámbito de negocios, actividades mercantiles, etc. Para abordar el problema del transporte, en este apartado, se va a exponer la formulación matemática de dicho problema, es decir, el algoritmo del transporte.

Si definimos  $x_{ij}$  como la cantidad transportada desde la instalación  $j$  hasta el cliente  $i$ , y  $c_{ij}$  como el coste de transporte de una unidad, y además identificamos  $a_i$  como la demanda total de cada cliente  $i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ), y  $b_j$  como la capacidad de almacenaje  $j$  ( $j=1,2,\dots,m$ ), entonces el problema planteado puede ser formulado (modelo matemático):

$$\text{Minimizar } \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad \text{Ec. 2}$$

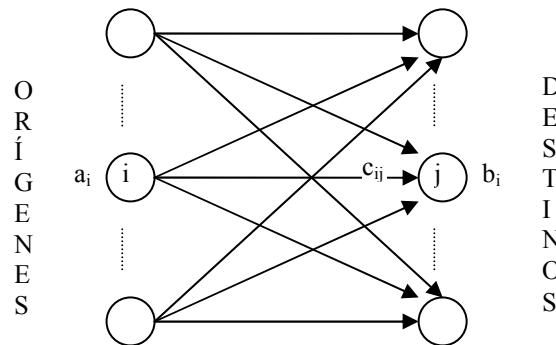
sujeto a:

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = a_i \quad (\text{requisito de la demanda del cliente } i, \text{ para } i=1,2,\dots,n)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = b_j \quad (\text{restricción de almacenaje } j, \text{ para } j=1,2,\dots,m)$$

El problema puede ser resuelto aplicando directamente programación lineal, en concreto el método simplex para redes, realizando los pasos: 1) Búsqueda de la solución factible inicial, 2) cálculo de los costos reducidos, 3) calculo de las variables de la base, y 4) operaciones de pivotaje. Con ello se obtiene la distribución idónea para cada instalación a partir del total del suministro que necesitará cada cliente para abastecer su demanda, de modo que se obtendrán los máximos beneficios con mínimos costes.

Gráficamente, tal y como muestra la Figura 9 podríamos representar el problema del transporte como un grafo<sup>8</sup> dirigido<sup>9</sup>. La representación grafica de los grafos se basa, principalmente en un diagrama de nodos y líneas donde los nodos representan los vértices y las líneas las aristas, pudiendo ser de muy diversas maneras y características (Dantzig 1997; Jordan 1996).



**Figura 9. Representación en forma de grafo del problema del transporte**

<sup>8</sup> Como una manera abreviada de la definición de grafo lo definiremos como una estructura  $G = (V,E)$  donde  $V$  será un conjunto de vértices y  $E$  un conjunto de aristas.

<sup>9</sup> Grafo dirigido. Se trata de un grafo donde los elementos de  $E$  (el conjunto de aristas) son pares ordenados. En este contexto cada arista se denomina arco, y  $u$  y  $v$  son sus extremos inicial y final. Esta definición nos conduce a llegar al concepto opuesto, aquellos que se definen como grafos no dirigidos.



El problema del transporte escrito en forma de ecuaciones para  $m$  orígenes y  $n$  destinos sería:

$$\begin{array}{rcccc}
 x_{11} + x_{12} + \cdots + x_{1n} & & & & = a_1 \\
 & x_{21} + x_{22} + \cdots + x_{2n} & & & = a_2 \\
 & & \ddots & & \vdots \\
 & & & x_{m1} + x_{m2} + \cdots + x_{mn} & = a_m \\
 x_{11} & + x_{21} & & + x_{m1} & = b_1 \\
 & x_{12} & & + x_{m2} & = b_2 \\
 & & \ddots & & \vdots \\
 & & & x_{1n} & + x_{2n} & + \cdots + x_{mn} = b_n
 \end{array}$$

Sin embargo, existe otra técnica denominada Técnica del transporte muy eficiente en este tipo de problemas. Para desarrollarla es necesario conocer las instalaciones, los clientes, la demanda total, la demanda por cada cliente y el coste de transporte entre cliente-proveedor. Esta técnica consiste en obtener, en una fase inicial, una solución viable, conocida como *solución factible inicial*. Para obtener esta primera solución es posible utilizar diferentes métodos heurísticos (tipo “greedy”), tales como: Método de la esquina Nordeste (Northwest Coner), el método de menor costo (Least-Cost), el método de la aproximación de Vogel’s. Posteriormente, se realiza la Mejora de la fase, es decir, la solución Final. Esta solución debe proporcionar una reducción del coste total. La estrategia que utiliza es la de variar los costes individuales para ver como se comportan los costes totales(Dantzig 1997; Daskin 1995; Salazar González 2001).

*Problema 2.* Una empresa debe distribuir 66 unidades de un producto desde sus tres almacenes a sus cuatro clientes. La cantidad de producto que tiene en cada almacén es 30,25 y 11 unidades, respectivamente. La demanda que solicita cada cliente es de 15, 17, 22 y 12 unidades de producto, respectivamente. El costo de transportar una unidad de producto desde cada almacén a cada cliente viene dado por la siguiente tabla. Describir un modelo matemático para determinar la cantidad de producto que conviene transportar desde cada almacén a cada cliente para satisfacer la demanda de estos con el menor coste de transporte posible.

ALMACÉN	CLIENTE1	CLIENTE2	CLIENTE3	CLIENTE4
1	6	2	6	7
2	4	9	5	3
3	8	8	1	5

Modelo matemático sería:

Sea  $x_{ij}$  la variable que determina la cantidad de producto que conviene transportar desde un almacén  $i$  a un cliente  $j$  ( $i \in \{1,2,3\}$  y  $j \in \{1,2,3,4\}$ ).

$$\text{Minimizar} \quad \begin{aligned} &6x_{11} + 2x_{12} + 6x_{13} + 7x_{14} + 4x_{21} + 6x_{22} + \\ &5x_{23} + 3x_{24} + 8x_{31} + 8x_{32} + 1x_{33} + 5x_{34} \end{aligned}$$

Sujeto a:

$$\begin{aligned} x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} &= 30 \\ x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} &= 25 \\ x_{31} + x_{32} + x_{33} + x_{34} &= 11 \\ x_{11} + x_{21} + x_{31} &= 15 \\ x_{12} + x_{22} + x_{32} &= 17 \\ x_{13} + x_{23} + x_{33} &= 22 \\ x_{14} + x_{24} + x_{34} &= 12 \\ x_{ij} &\geq 0 \quad \forall i \in \{1,2,3\} \text{ y } j \in \{1,2,3,4\} \end{aligned}$$

### 3.1.4. El problema de asignación (the allocation problem)

El problema de asignación es un caso particular del problema del transporte donde  $m=n$  y  $a_i = 1 \forall i$  y  $b_j = 1 \forall j$ , pudiendo ser aplicado en un elevado número de situaciones.

Un ejemplo típico es el de asignar  $n$  personas a  $n$  puestos de trabajo, exigiendo que cada persona solo pueda ser asignada a un puesto de trabajo, y que a cada puesto le sea asignada una sola persona. El modelo matemático introduciendo una variable decisional sería:

$$y_{ij} \quad \begin{cases} 1 & \text{si se cumple la asignación,} \\ 0 & \text{otro caso} \end{cases}$$

entonces el modelo matemático es:

$$\text{Minimizar} \quad \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} y_{ij} \quad \text{Ec. 3}$$

sujeto a:

$$\sum_{j=1}^n y_{ij} = 1 \quad (\forall i=1,2,\dots,n)$$

$$\sum_{i=1}^n y_{ij} = 1 \quad (\forall j=1,2,\dots,n)$$

$$y_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in \{1,\dots,n\} \text{ y } j \in \{1,\dots,n\}$$

Nótese que al tratarse de un caso particular del problema del transporte donde  $a_i = b_j = 1$ , entonces las variables  $y_{ij}$  serán enteras en una solución extrema óptima, y no hay necesidad de imponerlo explícitamente en el modelo matemático.

Una alternativa más eficiente que el algoritmo del Simplex para redes para este tipo de problemas es el conocido Método Húngaro, explicado detalladamente en el libro Programación Matemática (Salazar González 2001).

*Problema 3.* Una compañía está analizando la posibilidad de una expansión mediante la construcción de una nueva fábrica en Valencia o en Castellón o tal vez en ambas ciudades. También está pensando en construir como mucho un almacén pero la decisión de su localidad está condicionada a la ciudad donde se construya la nueva fábrica. En la segunda columna de la siguiente tabla se muestra el valor actual neto (VAN, rendimiento total que tiene en cuenta el valor del dinero en el tiempo) de cada alternativa. Los valores de la última columna indican el capital requerido para las respectivas inversiones, para las que se dispone de un capital total de 10 millones.

El objetivo es encontrar la combinación factible de alternativas que maximice el valor actual neto total.

INVERSIÓN	VALOR NETO*	ACTUAL	CAPITAL
Construir fábrica en Valencia	9		6
Construir fábrica en Castellón	5		3
Construir almacén en Valencia	6		5
Construir almacén Castellón	4		2
Capital total disponible			10

\* en millones de euros

donde las variables a definir para cada  $j \in \{1,2,3,4\}$

$$X_j = \begin{cases} 1 & \text{si se realiza la inversión } j \\ 0 & \text{otro caso} \end{cases}$$

Entonces, el planteamiento de la función objetivo a maximizar sería:

$$\text{Max} \quad 9X_1 + 5X_2 + 6X_3 + 4X_4$$

cuyas restricciones son:

$$6X_1 + 3X_2 + 5X_3 + 2X_4 \leq 10$$

$$X_3 + X_4 \leq 1$$

$$X_3 \leq X_1$$

$$X_4 \leq X_2$$

$$X_j \in \{1,0\}$$

Donde la primera condición representa al capital disponible. La segunda condición representa la exclusión de las variables  $X_3$  y  $X_4$ , es decir, que si se da una no puede darse la otra. La tercera condición hace referencia a la dependencia del almacén ( $X_3$ ) frente a donde se ubique la nueva fábrica, es decir, ni no se ubica  $X_1$  entonces  $X_3$  no debe hacerse, pero si se ubica  $X_1$  entonces  $X_3$  puede o no construirse. La condición cuarta es igual a la anterior pero con las variables  $X_2$  y  $X_4$ , respectivamente. Por último, la quinta condición es la que mantiene la condición de integridad y determina que se trata de un modelo de programación entera, adoptando estas variables valores binarios.

### 3.1.5. *El problema del camino más corto (The shortest path problem)*

El problema del camino más corto es el segundo problema más importante de la programación lineal el cual queda definido como: dada una red con costes asociados en cada una de sus aristas (o conexiones) encontrar la “distancia” total mínima (el camino más corto) de un nodo (s) a otro nodo (t). Esta distancia no ha de ser necesariamente medida en unidades métricas, puede tratarse de coste, tiempo o de otro tipo. En cualquier caso, este problema es comúnmente planteado por varias razones, sobre todo porque en los problemas de análisis de redes se busca conocer el camino más corto entre los nodos de demanda y las localizaciones candidatas. Este problema queda formulado mediante la siguiente notación:

- dato conocido disponemos de

$$c_{ij} = \text{Coste unitario de recorrer la arista (i,j)}$$

- las variables de decisión serían:

$$y_{ij} \begin{cases} 1 & \text{si la arista (i, j) es el camino más corto de s a t,} \\ 0 & \text{otro caso} \end{cases}$$

- el modelo matemático es:

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} y_{ij} \quad \text{Ec. 4}$$

sujeto a:

$$\sum_{j=1}^n y_{ji} - \sum_{k=1}^n y_{ik} = \begin{cases} -1 & \text{si el nodo } i = s \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \\ 1 & \text{si el nodo } i = t \end{cases}$$

$$y_{ij} = 0, 1 \quad \forall i, j$$

La función objetivo minimiza el coste total de viajar a través de las aristas seleccionadas. La primera restricción estipula que el flujo que entra al nodo  $i$  menos el que sale del mismo nodo ha de ser:  $-1$  si el nodo  $i$  es el nodo  $s$ ;  $1$  si el nodo  $i$  es el nodo  $t$  y  $0$  en otro caso. La última restricción exige que cada arista aparezca una única vez en el camino entre  $s$  y  $t$ .

La resolución del problema del camino más corto se vuelve ineficiente aplicando algoritmos estándares de programación lineal. Por ello, existe un gran número de algoritmos específicos para resolverlo, destacando el conocido Algoritmo de Dijkstra que detallaremos en el apartado siguiente.

### 3.1.5.1. Algoritmos para la resolver el problema del camino más corto

A continuación pasamos a detallar brevemente los algoritmos comúnmente utilizados que minimizan coste o distancia de la ruta que une dos nodos cualesquiera. En concreto estos son: el Algoritmo de Dijkstra, el Algoritmo de Floyd-Warshall y el Algoritmo de Bellman-Ford, aunque existen muchos otros para conseguir el mismo objetivo

#### **Algoritmo de Dijkstra**

La idea subyacente en este algoritmo consiste en ir explorando todos los caminos más cortos que parten del vértice origen y que llevan a todos los demás vértices, lo que equivaldría a construir un árbol divergente de la red. Cuando se obtiene el camino más corto desde el vértice origen al resto de vértices que componen el grafo, el algoritmo se detiene. Una de las limitaciones de este algoritmo es que no funciona en grafos con aristas de costo negativo, por ello también se le conoce como Matriz de pesos positivos. En definitiva, a cada nodo se le asigna una etiqueta, que es un indicador de la distancia del nodo origen al nodo en cuestión, realizando una partición de la red, de modo que se crea un conjunto de etiquetas permanentes (que se mantendrá hasta el final del proceso y que nos da precisamente el peso del camino más corto) y otro de etiquetas tentativas (pueden cambiar en las siguientes iteraciones dependiendo del camino que se va

escogiendo). En relación al tiempo polinomial requerido por el algoritmo indicaremos que es del orden de  $O(n^2)$ , donde  $n$  es el cardinal del conjunto de vértices.

### **Algoritmo de Bellman-Ford**

Se trata obviamente de un método iterativo con el objetivo de encontrar la mínima distancia de un nodo dado al resto de los nodos, permitiendo costos de arcos negativos. Se basa en etiquetar vértices donde al final de la  $k$ -enésima iteración la etiqueta representa los valores de dichos caminos más cortos formado por un número menor o igual a  $k$  arcos, pero con la diferencia fundamental respecto al de Dijkstra de que la etiquetación no se considera fija hasta el final del proceso, es decir, no encuentra la mejor ruta hasta que el algoritmo no se ha ejecutado por completo. El tiempo polinomial requerido por el algoritmo es en este caso del orden de  $O(n^3)$ .

### **Algoritmo de Floyd-Warshall**

A diferencia los dos algoritmos anteriores, que consideraba un nodo origen cada vez, este algoritmo obtiene la ruta más corta entre todo par de nodos (todos con todos), encontrando el camino más corto en una única ejecución, por ello es un claro ejemplo de programación dinámica (apartado siguiente). Éste empieza por caminos de un solo salto y en cada paso ve si es mejor la ruta de la iteración anterior o si por el contrario conviene ir por otro nodo intermedio. Otra de las diferencias fundamentales respecto al algoritmo de Dijkstra es que la matriz de pesos puede adoptar valores negativos. El tiempo polinomial requerido por el algoritmo es en este caso del orden de  $O(n^3)$ .

### ***3.1.6. Métodos para resolución de problemas NP-duros***

En la práctica, al tratar de resolver modelos matemáticos formulados a partir de programación lineal, es habitual encontrarse con un elevado número de restricciones y variables, aumentando éstas cuanto más realísticos es el modelo. Por ello, conseguir una solución a partir de métodos de optimización estándares conllevaría un elevadísimo tiempo y carga computacional además de no garantizar una solución aceptable y satisfactoria. Esta es la razón por la cual en las últimas décadas se han desarrollado otro tipo de algoritmos, que intentan alcanzar la solución óptima del modelo, y no siendo así garantiza soluciones factibles<sup>10</sup>. Son los conocidos como métodos heurísticos, Relajaciones, Ramificación y Acotación (“branch-and-bound”), Ramificación y corte (“branch-and-cut”), Algoritmos Genéticos, Redes Neuronales y programación dinámica, muy empleados en la resolución de problemas perteneciendo a la clase NP-duros<sup>11</sup> (Current 2001; Salazar González 2001).

---

<sup>10</sup> Este conjunto de soluciones factibles puede ser exageradamente alto, con lo que para determinar con tiempos de cálculo razonables alguna solución al problema planteado se hace necesario diseñar algoritmos efectivos.

<sup>11</sup> Un problema NP-duro es aquel para el cual no existe un algoritmo en tiempo polinómico que lo resuelva (ver apartado 3.1.2)

### 3.1.6.1. **Heurísticos**

*Definición Algoritmo Heurístico.* Se llama algoritmo heurístico a cualquier algoritmo que con poco esfuerzo computacional proporcione una solución factible cuyo valor objetivo normalmente esté próximo al valor objetivo óptimo del problema original.

Estos algoritmos son la alternativa más utilizada para resolver modelos clasificados como NP-duros, del tipo p-mediano, UFLP, p-centro, de cobertura, etc, como veremos en los apartados sucesivos, llegando a alcanzar, aplicado de manera eficiente, la solución óptima o una muy próxima a ésta. Existe un elevado número de técnicas heurísticas propuestas en la bibliografía existente, siendo clasificadas básicamente en dos grupos: constructivos y de mejora. Todos ellos comparten la idea o concepto de “relación de vecindad”, donde a partir de una solución dada se obtiene un subconjunto de todas las soluciones vecinas, mediante procesos iterativos. No obstante, estas técnicas se caracterizan por ofrecer una solución óptima local, dificultad que otras técnicas superan (Salazar González 2001).

#### **Heurísticos constructivos**

Son procedimientos que alcanzan una solución factible sin precisar de ninguna previa con un esfuerzo computacional moderado. En este grupo nos encontramos con el conocido Greedy en sus dos vertientes, “greedy add” y “greedy drop”. El *greedy add* empieza por un conjunto vacío, y de forma iterativa va ampliando dicho conjunto con el elemento (una ubicación) que más contribuya a la función objetivo, deteniéndose cuando no exista ninguno. El *greedy drop* actúa al contrario, tomamos un conjunto inicial grande y se van eliminando aquellos que produzcan un mayor incremento en la función objetivo hasta que no exista ninguno.

#### **Heurísticos de mejora**

Estos heurísticos tratan de alcanzar una solución factible de costo inferior basándose en soluciones previas. Dos de los algoritmos ampliamente destacados como de mejora son el “Vecino más próximo” y el “Interchange”. El *Vecino más próximo* empieza con cualquier solución factible y en cada iteración se amplía el conjunto introduciendo un nuevo elemento del vecindario y evaluando de nuevo escogiendo el mejor, hasta que no existen más elementos a introducir. A finales de los setenta, Teitz y Bart desarrollaron el ampliamente conocido *algoritmo de Intercambio* principalmente para resolver el problema p-mediano. Se inicia a partir de un conjunto arbitrario de elementos (ubicaciones) de entre el total de los elementos a evaluar (sitios candidatos) de una manera provisional, y obteniéndose la función objetivo. A continuación, un elemento no perteneciente al conjunto inicial sustituye a cada uno de ellos temporalmente, y en el momento que la función objetivo mejora, este conjunto se toma como permanente. Este procedimiento se repite para cada elemento que no forma parte en el conjunto inicial.

Una cuestión importante en los heurísticos de mejora es decidir como obtener la solución inicial para comenzar uno de estos procedimientos. En definitiva, hay dos maneras de obtenerla, o bien se utiliza otro heurístico (greedy), o se utiliza el propio algoritmo de

intercambio para obtener la solución inicial arbitraria. A la combinación de varios heurísticos se le denomina metaheurística, cuya aplicación trata de superar un importante inconveniente, y es que los algoritmos anteriormente vistos no pueden asegurar que la solución alcanzada sea la óptima.

### **Otros heurísticos avanzados: meta-heurísticos**

A continuación, pasamos a detallar los meta-heurísticos más empleados en problemas de localización (máxima cobertura, problemas de localización hub, el p-mediano, asignación de rutas, etc.), siendo estos: Simulated annealing, Tabu search, GRIA (Global/Regional Interchange algorithm), los algoritmos genéticos y las redes neuronales, principalmente. M.A. Arostegui et al. (Arostegui 2006) realiza una comparación empírica entre tres métodos heurísticos generales (Simulated annealing, Tabu search y genetic algorithms) para resolver problemas de localización de instalaciones concluyendo que el algoritmo de Tabu Search es el que alcanza mejores resultados, siendo además el más sencillo y fácil de implementar. Drezner et al. (Drezner 2002) compara la efectividad de cinco heurísticos para resolver un problema de localización p-mediano concluyendo que el Simulated annealing combinado con un algoritmo ascendente ofrece los mejores resultados en el espacio discreto. El propio autor deja una línea de investigación proponiendo la aplicación de otros heurísticos en el espacio continuo y analizar la sensibilidad de las soluciones. Otros autores, ya han plasmado sus resultados destacando los satisfactorios resultados producidos por el algoritmo de Tabu Search, el cual pasamos a describir.

La técnica de “Tabu search” se ha revelado como una de las mejores en los últimos años. Se trata de un procedimiento de mejora donde ciertos movimientos (intercambios) no pueden realizarse para evitar que se repitan soluciones anteriores, además de continuar utilizando el concepto de vecindad de una solución, unido a una lista de movimientos prohibidos que se genera dinámicamente durante el proceso del algoritmo. Un ejemplo de esta técnica la presentan recientemente J.M. Lee y Y.H. Lee (Lee 2010) aplicada a un problema de localización de cobertura con jerarquías con el objetivo de encontrar las localizaciones que maximicen en número de consumidores abastecidos, siempre y cuando estén ubicados dentro una distancia específica fijada desde la propia instalación. Para ello el modelo es formulado mediante programación entera mixta, siendo resuelto a partir de metaheurísticos (Tabu search) proporcionando una alta calidad en la solución en un tiempo aceptable computacionalmente hablando.

La técnica de “Simulated annealing” es un algoritmo de búsqueda local por vecindades, pero en este caso de manera aleatoria, donde los movimientos que mejoran la función objetivo se aceptan sin duda, y los que la empeoran se aceptan dependiendo de otro parámetro controlable que va disminuyendo a medida que avanza el proceso iterativo (Current 2001).

Una técnica desarrollada más recientemente por Densham and Rushton es la llamada “GRIA” (Global/Regional Interchange Algorithm) que combina dos heurísticos clásicos de optimización, siendo estos el ya mencionado algoritmo de Teitz-Bart con otro algoritmo desarrollado por Maranzana en 1964. El método GRIA aplica ambos heurísticos consecutivamente para cada iteración, comenzando con una configuración



arbitraria de  $p$  elementos (lugares candidatos). Consiste inicialmente en un intercambio global entre elementos donde la sustitución se convierte en definitiva si el coste global disminuye. Posteriormente, aplicando el algoritmo de Maranzana se da paso a un intercambio regional. Ambos algoritmos se ejecutan en cada iteración hasta que el intercambio no produce diferentes resultados (Kaiser 2000).

Los “Algoritmos Genéticos” son heurísticos inspirados por poblaciones evolutivas cuyos individuos tratan de optimizar su existencia mediante recombinación y mutación de genes. Habitualmente se comienza con una población inicial de  $n$  individuos, aplicando a cada uno de ellos un proceso de mejora para convertirlos en óptimos locales, y se les aplica operaciones denominadas de cruce y de mutación en cada iteración, de las cuales dependerá la solución final.

Las “Redes Neuronales” consisten en modelos conexionistas que tratan de simular el cerebro humano. Estos heurísticos fueron inspirados por los últimos avances de la Ingeniería Electrónica para la resolución de problemas complejos. A efectos prácticos, esto se traduce en tratar de aprovechar la capacidad paralela de muchos ordenadores generando la subdivisión de tareas, de manera que el sistema general se mantenga lo más estable posible.

### 3.1.6.2. *Relajaciones*

Mientras que los métodos heurísticos anteponen disminuir el tiempo de resolución del algoritmo sobre la calidad de la solución (se encuentran buenas soluciones a muy diversos problemas de localización en tiempos relativamente bajos) las relajaciones, a pesar de no obtener una solución óptima de la función objetivo, pueden aproximar la solución del heurístico a la óptima estableciendo límites. Esto es lo que se conoce como *Relajaciones*, siendo una de las más destacadas la *Relajación Lagrangiana*, aunque hay otras posibles tales como la “*Relajación por eliminación*”, “*Relajación lineal continua*”, “*Relación subrogada*” y la “*Relajación por descomposición*” (Salazar González 2001).

La Relajación Lagrangiana consiste básicamente en cambiar una o varias restricciones del modelo original (generalmente no lineal) mediante una combinación lineal de las mismas, aplicando multiplicadores de Lagrange, y dichas combinaciones se añaden a la función objetivo. Una de las tareas más complejas de este método es determinar los valores óptimos de dichos multiplicadores, reduciendo el problema a encontrar estos valores. La principal atracción de este método es que proporciona los límites superior e inferior (minimización y maximización del problema, respectivamente) en el valor de la función objetivo óptima, es decir este valor se encuentran comprendido entre la mejor solución factible encontrada y un valor que no puede ser mejorado. Se encuentra la solución óptima cuando la región comprendida entre los límites mencionados alcanza el cero o el mínimo valor basado en las propiedades del modelo (menor del 1%). Habitualmente, para concretar el problema de la Relajación Lagrangiana, así como muchos de los heurísticos considerados, se aplica la formulación sobre un problema  $p$ -mediano (Current 2001; Daskin 1995; Salazar González 2001).

### 3.1.6.3. **Ramificación y Acotación (“branch-and-bound”)**

Esta técnica introducida por Land y Doig en 1960 se aplica en problemas de programación lineal entera, y además se convierte en una de las herramientas para resolver problemas combinatorios NP-duros tales como el problema del viajante, el problema de la mochila, el problema de localización sin capacidades, el problema del árbol de Steiner, el problema de partición, etc. (Daskin 1995; Salazar González 2001). La clave en estos problemas es que dado que tienen un número finito de soluciones, encontrar un óptimo mediante un proceso recursivo dividiendo y examinando la región factible. Pero en la práctica, puesto que existe una función objetivo sólo se explorarán ciertas zonas interesantes de esta región. A este enfoque se le conoce como Ramificación y Acotación.

Durante este problema recursivo se van examinando diversos problemas enteros que suelen representarse mediante un *árbol decisional*<sup>12</sup> como explicamos a continuación: cada problema coincide con un *nodo*, y la creación de dos subproblemas a partir de un nodo dado conecta a éste con aquellos mediante dos líneas que llamamos *ramas*. Al proceso de crear estos dos subproblemas se le llama Ramificación. El nodo que genera dos subproblemas se le conoce como nodo padre, y a los dos nodos de dichos subproblemas se le llaman nodos hijos. Este problema, además se caracteriza por establecer una cota superior del problema entero (una estimación por exceso del valor objetivo óptimo) y una cota inferior del nodo asociado al subproblema (una estimación por defecto del valor objetivo de cualquier solución entera de éste subproblema). Al proceso de calcular y comparar las cotas se le llama acotación. Uniendo ambos procesos obtenemos en conocido *algoritmo de ramificación y acotación*.

### 3.1.6.4. **Programación Dinámica**

La *Programación Dinámica* es una técnica alternativa a la Ramificación y Acotación anteriormente vista, cuya diferencia fundamental es que no precisa de una formulación matemática basada en la relajación (proceso de acotación) del problema, sino en un proceso recursivo del problema que evite resolver todos los subproblemas planteados, ya que muchos pueden ser iguales, de modo que sus soluciones se van almacenando (de menor a mayor) y se dispondrá de ellas cuando se necesiten, sin necesidad de volver a resolverlos. Esta característica de cualquier problema de programación dinámica se le denomina el *Principio de optimalidad de Bellman* (ver más información y formulación en Salazar González 2001).

---

<sup>12</sup> Este esquema de árbol decisional se transforma en algoritmo para minimizar el número de ramificaciones, y por tanto producir una metodología efectiva en la resolución de algunos ejemplos difíciles.

### **3.2. INTRODUCCIÓN A LA TEORÍA DE LA LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE INSTALACIONES**

#### **3.2.1. Introducción**

Para contextualizar el campo de la teoría y modelos de localización debemos remontarnos a la primera mitad del siglo veinte donde el economista Alfred Weber, en 1909, plantea, dentro de la lógica de la localización industrial, las primeras contribuciones de la denominada teoría de la localización clásica. El objetivo del modelo de Weber, también conocido como minisum, consistía en minimizar los costes totales de las instalaciones empresariales, y fue este el objetivo que prevalecería en la literatura varias décadas después, debido al escaso avance y desarrollo de la investigación en este campo. A partir de los años 60, la teoría de la localización tomó una relevancia importante entre los investigadores de la época y éstos han continuado realizando estudios, resolviendo problemas de localización mediante modelos matemáticos, basándose en la teoría clásica. Este es el caso de autores pioneros en esta materia como Hakimi (1964) precursor del problema p-mediano, Charles Church que formuló junto con ReVelle los primeros modelos de cobertura (Church 1974), Reville, Marks y Liebman (1970) fueron unos de los primeros en distinguir entre problemas de localización en el sector público y privado, Zvi Drezner, y muchos otros, cuya aportación fue fundamental para el desarrollo de la misma.

La localización de las actividades humanas ha sido una cuestión importante en el ámbito de la geografía, dada su estrecha relación con uno de los temas que más ha preocupado en los últimos tiempos: **la organización espacial del territorio**. Por ello, esta disciplina, junto con otras (economistas, científicos regionales, geógrafos, matemáticos, etc.) se ha dedicado a tratar y desarrollar conceptos, métodos e instrumentos para describir y explicar la localización de las actividades humanas sobre él. Podríamos citar a modo de ejemplo, la necesidad de estudios para la localización de industrias, con el correspondiente detenimiento del estudio en los costes de transporte para la decisión de la localización de las mismas, así como estudios medioambientales y socioeconómicos (Bosque 2004). Otro ejemplo significativo es la localización de un vertedero municipal como uno de los servicios primordiales en nuestras sociedades actuales en el cual reciclar, reusar o incinerar los residuos urbanos que produce una población. Con este ejemplo queda patente que la preocupación y el respeto por el medio ambiente también debe quedar plasmado como objetivo en los problemas de localización. Sin embargo, no fue hasta mediados de los 70, debido al aumento de la conciencia ecológica y social de los usuarios de los servicios, cuando se manifestó de forma evidente (Eiselt 2007).

El lugar donde se localice una instalación quizá sea uno de los factores más estudiados a la hora de establecer un servicio o instalación, debido a las consecuencias que ocasiona tal decisión. El estudio de estos problemas puede realizarse mediante el análisis de modelos de tipo cuantitativo que se conocen con el nombre de **modelos de localización**. Existen una gran cantidad de estos modelos, que consideran aspectos muy variados, como el número de centros a localizar, características del espacio de localización, conjunto de localizaciones posibles, medidas para la estimación de distancias, criterios de eficiencia y equidad, etc., dependiendo del tipo de problema que se considere. Los modelos que más se han estudiado son aquellos en los cuales se desea ubicar una instalación/actividad para satisfacer la demanda en una zona geográfica bajo estudio. En

tales casos, las mejores localizaciones suelen ser aquellas para las que se minimiza alguna función de los costes de transporte o del tiempo de desplazamiento de los usuarios al centro que los sirve. Estos conceptos quedarían enmarcados en lo que denominaríamos un **análisis de localización**, el cual intrínsecamente se refiere al modelo matemático, formulación y resolución de un tipo de problema donde el objetivo es ubicar una instalación en un espacio dado. Este espacio puede adoptar diferentes dimensiones y características presentando muy diversos problemas de localización, diferenciando frecuentemente entre problemas de localización plana y problemas de localización en red, y cada uno de ellos subdividido en espacio continuo y discreto (Revelle 2005). Un estudio pormenorizado de los modelos más frecuentes aparece en los libros de Love, Morris y Wesolowsky (Love 1988), Francis y White (Francis 1974), y Daskin (1995). Una clasificación reciente de este tipo de modelos puede encontrarse en Hamacher y Nickel (Hamacher 1998), ReVelle, Eiselt y Daskin (ReVelle 2008) y una revisión de las aplicaciones de estos modelos puede consultarse en Brandeau y Chiu (Brandeau 1989).

El problema de la localización de instalaciones no está referido únicamente a la localización de la instalación propiamente dicha, sino que en algunos casos la capacidad de respuesta a una emergencia, por ejemplo, es el objetivo relevante (Sule 2001). En esta línea, podríamos citar algunos ejemplos de la aplicación del análisis de localización de instalaciones de este tipo, tales como emergencias en hospitales o centros de salud (Murawski 2009), incendios, primeros auxilios en una planta industrial, etc.

No obstante, un número elevado de modelos de localización no podrían ser enunciados ni posteriormente resueltos sin utilizar para ello la programación lineal. La mayoría de los problemas de localización en redes y localización discreta están formulados mediante programación lineal donde alguna de las variables son condiciones del problema y toman únicamente valores enteros. Estos son los conocidos como problemas de programación lineal entera. En particular, existen dos problemas de programación lineal con un carácter especial los cuales son planteados frecuentemente en un análisis de localización. Este el caso del denominado “problema del camino más corto” donde se busca la menor distancia entre una instalación y un punto de demanda. El otro problema es el conocido “problema del transporte”, donde las localizaciones de las instalaciones están asignadas y son inamovibles, únicamente se debe determinar a que punto de demanda sirve cada instalación de manera que se minimice el coste total.

Habitualmente, a los modelos de localización se les atribuye el sobrenombre de “localización-asignación” debido a que en muchos de ellos se consideran dos cuestiones simultáneamente: 1) determinar el número de instalaciones y su localización óptima, y 2) la asignación de la demanda a cada una de las instalaciones ubicadas, es decir, determinar el área de servicio. Es el caso típico de localización de centros de distribución, una sucursal bancaria o la localización de un supermercado, y como veremos, pueden aplicarse a un elevado número de diferentes escenarios y complejas formulación. Para resolver este tipo de problemas complejos es necesario un elevado cálculo computacional, por lo que en muchas ocasiones se recurre a métodos heurísticos para obtener la mejor solución (Francis 1974).

### 3.2.2. *Factores de un problema de localización*

En cualquier estudio de localización aparecen determinados componentes básicos que hay que considerar para llevar a cabo un procedimiento de análisis. Son cuatro los componentes que caracterizan un problema de localización (Revelle 2005): 1) consumidores (o demanda), cuya localización es conocida, 2) instalaciones, las cuales serán ubicadas, 3) el espacio, donde tanto consumidores como instalaciones se localizan, y 4) la distancia o tiempo entre instalaciones y consumidores. En Bosque Sendra (Bosque 2004) se hace una división similar pero introduciendo los denominados factores de localización, estableciendo los componentes básicos en tres grandes grupos:

- La componente humana. Está íntimamente relacionada con la instalación específica que se desea localizar. En otras ocasiones, no se trata de ubicar una instalación propiamente dicha, sino de localizar determinadas actividades, tales como establecer la localización de determinados usos del suelo o cultivos.
- Los elementos específicos que intervienen directamente en un problema de localización. Éstos se denominan **factores de localización** y varían dependiendo del tipo de problema que se esté planteando. No son los mismos factores los que intervienen en la localización de una nueva planta que aquellos que habría que tener en cuenta para ubicar, por ejemplo, una multinacional
- Por último, las infraestructuras por las cuales discurren los elementos del problema de localización, es decir, la red de comunicaciones. Por dichas comunicaciones es por donde se producen los flujos espaciales entre los distintos elementos.

En base a estos elementos podemos determinar dos problemas de localización. El primero, lo denominamos el **problema del trazado óptimo** de redes de comunicación, en sus dos vertientes, si se trata de establecer una nueva red, o por el contrario, identificar la trayectoria más adecuada para un desplazamiento concreto, donde las instalaciones/actividades ya están ubicadas y los factores de localización están fijados. El segundo, se centra principalmente en el clásico **problema de la localización** de alguna instalación/actividad, donde no se conoce la ubicación de las mismas pero sí está establecido el sistema o red que encauzará los movimientos o flujos (red de comunicaciones). Se debe encontrar la ubicación óptima de la instalación. En este último, se pueden distinguir diferentes problemas, tal y como veremos a lo largo del capítulo, variando uno o varios factores de localización, por ejemplo: espacio continuo o discreto, tipo de distancia, tipo de instalación, tipo de demanda, tipos de modelos, etc.

### 3.2.3. *Diferentes tipos de problemas en la localización de instalaciones*

Mark Daskin (1995) detalla en su libro “Network and Discrete Location” el problema de la localización de instalaciones y como abordarlo a partir de modelos que veremos a continuación. Para modelar un determinado problema de localización es necesario un entendimiento de las operaciones e interacciones del mundo real con el objetivo de que éstas sean reflejadas en dicho modelo, y que además la simplicidad de dichos modelos en muchas ocasiones responde mejor a la obtención de una solución. En este sentido, es necesario preguntarse siempre si mejorando la ubicación de una instalación es el modo más efectivo de mejorar el sistema bajo estudio.

En los modelos matemáticos de localización es básico conocer determinadas cuestiones u objetivos de carácter general, tales como, cuál es el número de instalaciones que deberían ser ubicadas, dónde debería cada instalación ser localizada, cuál sería la capacidad de dichas instalaciones o cuál sería la demanda esperada. La respuesta a estas preguntas depende íntimamente del contexto en el cual el problema de localización esté siendo resuelto y de los objetivos subyacentes del problema de localización. Por ejemplo, en algunos casos, la solución óptima sería aquella que la instalación se ubicara lo más cerca posible a los lugares de demanda, y en otros casos, la situación opuesta. Puede ocurrir que si aumentamos el número de instalaciones, obtenemos que aumenta el coste del servicio, con lo cual se ha de tener muy en cuenta la relación servicio/coste (Bosque Sendra 2004).

Con el objetivo de que el resultado de un problema de localización espacial resulte satisfactorio se debe adoptar una metodología adecuada, como se muestra en la Tabla 11, donde el analista contempla numerosos aspectos de los anteriormente descritos.

<b>ETAPAS DE UN PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN</b>	
1. Planteamiento del Problema a resolver	Identificar el problema Identificar los decisores e implicados
2. Determinación de los criterios u objetivos	Número de objetivos a optimizar, tipo, etc.
3. Fijación de las restricciones	Teniendo en cuenta la oferta Teniendo en cuenta la demanda Teniendo en cuenta las relaciones espaciales
4. Formalización del problema	Formulación/ adopción del modelo matemático Definición de los objetos abstractos que representaran la localización de las instalaciones, demanda, afectados,
5. Recogida de datos	
6. Aplicación de las técnicas de optimización adecuadas	Programación matemática Algoritmos heurísticos o búsqueda iterativa
7. Análisis de las soluciones obtenidas	Valoras las limitaciones de dichas soluciones Sensibilidad de los resultados obtenidos a posibles modificaciones
8. Comunicación de los resultados	Documentar la metodología Presentar las soluciones Realizar las recomendaciones
9. Eventual iteración del proceso de decisores e implicados	de acuerdo a informaciones provenientes de
10. Decisión por parte de los responsables	
11. Puesta en práctica de la solución	
12. Seguimiento de la ejecución y de los resultados reales alcanzados	

**Tabla 11. Esquema en la localización de instalaciones. Fuente: (Daskin 1995)**

Los problemas y modelos de localización han sido clasificados de muy diversas maneras (Brandeau 1989; Hamacher 1998; Owen 1998; ReVelle 2008) atendiendo a diferentes criterios. A continuación, se presenta un resumen (Daskin 1995; ReVelle 2005) de algunos de los distintos tipos de problemas de localización que se encuentran en la literatura existente. Esta recapitulación de problemas debería ser el primer acercamiento para centrar e identificar un problema de localización.

#### **Problemas de localización planos versus en red. Espacio continuo y discreto**

La representación espacial tanto de los consumidores/clientes como de los lugares candidatos para las instalaciones/actividades es una de las diferencias fundamentales entre modelos de localización. En el primer caso, modelos de localización planos, la demanda (representada como una distribución de probabilidad espacial mediante coordenadas  $X, Y$ ) y las instalaciones pueden localizarse en cualquier lugar de un plano. Esta descripción de modelo plano es una representación de la realidad muy simplificada (dos dimensiones), alejada de la complejidad real, pero puede entenderse como una primera aproximación a la solución. Las distancias utilizadas en este espacio plano, suelen ser, la rectangular, distancia métrica o euclídea, aunque otras también pueden ser empleadas.

Sin embargo, en el caso de entender el espacio como una red, se asume que los desplazamientos, las instalaciones y la demanda sólo pueden ubicarse en una red o grafo, compuesta por arcos y nodos. Habitualmente, la demanda se localiza únicamente en los nodos de la red y las instalaciones en los nodos o arcos. Las distancias en un problema de localización en red se miden sobre la propia red, habitualmente es el camino más corto medido a través de la red que conectan dos puntos (encontrar el “camino más corto” requiere la utilización de algoritmos matemáticos especializados como los vistos en el apartado 3.1.5, así como una fase de preprocesamiento).

Tanto los problemas planos como los continuos pueden subdividirse en problemas de localización continuos y discretos. En un espacio continuo, los puntos pueden ser ubicados en cualquier lugar del plano o de la red. Por el contrario, en un espacio discreto los puntos a localizar solo pueden hacerlo en unos determinados lugares candidatos en el plano o en la red, previa fase de selección. Un ejemplo de problema discreto en el plano podría ser la localización de antenas repetidoras de telefonía móvil cuyos lugares candidatos se reducen a las zonas más altas de las montañas. Un ejemplo de problema de localización discreto en una red sería la localización de instalaciones al por menor, que únicamente pueden ser ubicados en lugares zonificados para tal fin. Trasladando estos conceptos matemáticamente, los problemas continuos (en su mayoría en espacio plano), suelen resolverse mediante programación u optimización no lineal, mientras que los problemas en red se resuelven mediante programación lineal (variables de decisión binarias, 0-1) u optimización combinatoria, utilizando los algoritmos o técnicas, dependiendo de cada caso, descritas en el apartado de introducción a la Programación lineal revisado anteriormente.

Por último, los modelos de localización discreta permiten una mayor flexibilidad y verosimilitud en la modelización de la realidad y del problema, añadiendo unos mayores requerimientos de información y manipulación de datos. Son generalmente formulados basándose en programación entera-mixta permitiendo el modelado de un amplio número de problemas.

### **Representación del problema mediante árboles o grafos**

Dentro de la clasificación de problemas de localización discreta, frecuentemente se distingue entre aquéllos que se representan mediante un árbol (red donde al menos hay un camino desde cualquier nodo hasta otro nodo cualquiera), o por su mayor complejidad, los que deben ser planteados como un grafo (representación gráfica basada principalmente en un diagrama de nodos y líneas donde los nodos representan los nodos y las líneas las aristas).

### **El cálculo de la distancia**

Los problemas de localización también pueden ser caracterizados según la distancia métrica utilizada, que generalmente suele ser aquella que proporcioné el camino más corto entre cualquier par de nodos usando los arcos que componen la red. En el apartado 3.1.5.1 discutimos los diferentes algoritmos para encontrar el camino más corto en una red entre dos puntos. En problemas de localización plana, las distancias métricas más empleadas son: distancia de Manhattan, distancia euclídea y  $l_p$  distancia métrica (igual que la euclídea siendo  $p$  valores positivos mayores que 2).

### **El número de instalaciones a localizar**

En este tipo de problemas podemos distinguir entre problemas de localización de instalación simple (single versus multiple facilities) o de instalación múltiple. En el primer caso, el objetivo es ubicar una única instalación, y en el segundo varias instalaciones, donde el número es fijado por el planificador o por algún tipo de limitante económico. En otros casos, el número de instalaciones es un dato incógnita del propio problema de localización (endógeno) para hacerlo óptimo.

Uno de los ejemplos más estudiados en esta categoría es el problema de localización de una instalación, con la finalidad de minimizar los costes de puesta en marcha y distribución, facilitando el número de instalaciones necesarias para cumplir con la solución de coste mínimo. Ejemplos y planteamientos de modelos podemos verlos en la obra de Francis y White (Francis 1974) donde se dedican varios capítulos a este problema de localización, así como también en Love, Morris, Wesolowsky (Love 1988).

### **Problemas de localización estáticos versus a dinámicos**

En los problemas de localización estáticos los datos de entrada no dependen del tiempo, sino que se toma un conjunto representativo de ellos para resolver el problema. Sin embargo, generalmente los datos de entrada, tales como la demanda, los costes y las instalaciones nuevas o preexistentes, dependen del tiempo, es decir, no solo se debe responder a la pregunta de dónde se localizará la instalación sino de cuándo invertir en una nueva instalación o cerrar otra. Esto es debido a que la inversión requerida para localizar o relocalizar una instalación es normalmente alta, y por lo tanto se espera que dicha planta este operativa un periodo de tiempo considerable. Esto conlleva una planificación a largo plazo, donde determinados parámetros varían a lo largo del tiempo y donde la incertidumbre es inherente en este tipo de problemas. Owen y Daskin (Owen 1998) realizan una clasificación de este tipo de problemas, donde diferencian principalmente entre modelos dinámicos de localización de una única instalación o múltiples. En Current et. al. (1997) se introduce el problema del análisis de localización dinámico para identificar la localización de un conjunto inicial de instalaciones cuando el número total de instalaciones a ubicar es incierto. Este problema de decisión es



abordado desde dos enfoques distintos asumiendo que existe un número finito de opciones de decisión.

#### **Modelos deterministas versus a probabilísticos**

Además de que los datos de entrada como hemos visto anteriormente puedan ser estáticos o dinámicos, también pueden ser deterministas (ciertos) o probabilísticos (sujetos a incertidumbre).

#### **Modelos de producción simple versus producción múltiple**

Normalmente en casi todos los modelos se asume que el producto o servicio es homogéneo (simple) y que toda la demanda es igual. Sin embargo, en la realidad, esto no ocurre de este modo en determinados casos, y en ocasiones los productos se distinguen por tener distintos orígenes y destinos.

#### **Problemas de localización del sector público versus privado**

Unos de los primeros en distinguir entre problemas de localización en el sector público y privado fueron Revelle, Marks y Liebman (1970). La diferencia fundamental entre ambos es la relación y análisis coste/beneficio. En el sector privado, el coste de inversión y los beneficios se miden en unidades monetarias y además incide en: la empresa, su gestión y los socios, buscando minimizar la suma de los costes anuales de distribución e inversión. En el sector público, no ocurre del mismo modo y los agentes implicados tampoco son los mismos, ni los costes/beneficios se miden en unidades monetarias, además de tratarse, en muchos casos, de un proceso político-gubernamental. En el sector público se busca optimizar el acceso de la población a las instalaciones/servicio.

#### **La demanda elástica frente a la no elástica**

La demanda depende fundamentalmente de la instalación que se desee localizar, del tamaño y del tipo, es decir, que la mayoría de las veces depende del servicio que la instalación ofrezca, lo que denominaríamos demanda elástica. Normalmente, la demanda se comporta como elástica respecto a los costes de desplazamiento, aumentando éstos cuando disminuye el número de consumidores. Por otra parte, la demanda permanece rígida, o conocida como demanda inelástica, cuando es independiente del nivel de servicio, por ejemplo un colegio.

#### **Instalaciones con capacidad limitada o ilimitada**

Muchos modelos de localización de instalaciones tales como el de máxima cobertura, el p-mediano, el p-centro, tratan instalaciones con capacidad ilimitada. Sin embargo, en otros modelos está implícito establecer límites en la instalación. Incluso en otros casos, la capacidad de la instalación es una incógnita y por lo tanto un resultado del problema.

El problema de localización de instalaciones con capacidad limitada (CFLP, capacited facility location problem) puede ser aplicado en una gran variedad de áreas como planificación territorial, telecomunicaciones, distribución, gestión energética como ejemplos (Melkone 2001). Melkone y Daskin exponen el problema clásico de una CFLP pero extendido al caso especial de una red, con la consiguiente condición referida a la capacidad de la demanda que dichas instalaciones pueden abastecer.

### **Modelos de “instalación más próxima” versus “asignación de la demanda general”**

La asignación de la demanda a una instalación es uno de los puntos críticos en la teoría de la localización. Frecuentemente, la demanda es asignada a la instalación más próxima teniendo ésta la capacidad de absorber dicha demanda. En problemas de capacidad limitada, es posible repartir la demanda en caso necesario entre varias instalaciones, pero en el caso que no pudiera realizarse sería necesario introducir condiciones en el modelo para asegurar que toda la demanda sea asignada a una única instalación. En otros casos, el modelo interpreta que una fracción de la demanda es abastecida por la instalación más cercana, y el remanente será abastecido por otra más alejada.

### **Modelos sencillos o con jerarquías**

Existen modelos en los que las instalaciones conforman un nivel jerárquico, es decir, existe un flujo entre las instalaciones que están siendo localizadas y unas se encuentran en niveles superiores a otras. Un ejemplo de este tipo sería en sistema de salud, donde existen centros médicos (ambulatorio) como nivel más bajo y el hospital como el nivel más alto.

### **Instalaciones deseadas o no deseadas**

Esta es una de las clasificaciones más recientemente estudiadas y que desarrollaremos con detalle en el apartado siguiente. Se consideran instalaciones deseables aquellas que la población considera importantes que se ubiquen lo más cerca posible, tales como, colegios, hospitales, oficinas de correos, centros comerciales, etc. Sin embargo, se consideran instalaciones indeseables en este sentido aquellas que la población quiere que se localicen lo más alejadas posible, como vertederos, plantas de residuos sólidos urbanos, plantas incineradoras, prisiones. Otra clasificación intermedia a las anteriores es la de instalaciones semi-deseables como veremos a continuación.

#### ***3.2.4. Clasificación de los modelos de localización***

Los modelos de localización, en términos generales, son diseñados con la finalidad de representar el proceso de ubicar instalaciones en un lugar determinado (Revelle 2005). Como hemos visto anteriormente, existe un gran número de ejemplos donde es posible aplicar dichos modelos, como vertederos, gasolineras, plantas de producción eléctrica, tratamiento de aguas, residuos urbanos, hospitales, colegios, etc., es decir, el problema de la localización concierne a un gran número de disciplinas y puede ser aplicado a diferentes escenarios en la práctica. Éstos, como veremos a continuación, son modelos matemáticos que intentan establecer la mejor localización de un fenómeno, instalación, actividad, etc., conociendo los elementos que intervienen en su utilización, así como su distribución espacial.

Atendiendo precisamente al criterio espacial, nos encontramos con una de las primeras clasificaciones de los modelos de localización (Church 2002) realizada por Charles Revelle en los años setenta. En este estudio los modelos de localización se dividían en problemas de localización planos (planar location problems) y problemas de localización en red (network location problems), y éstos a su vez, se dividían en espacio continuo y espacio discreto. Posteriormente, el mismo autor (ReVelle 2008) y refiriéndose de nuevo como principal criterio al espacial, divide los modelos de localización en cuatro grandes

categorías: modelos analíticos, modelos continuos, modelos en red y modelos discretos. Es en estos últimos donde el autor realiza una exhaustiva revisión de la literatura, dividiéndolos en dos grupos: 1) problemas de localización de una planta y *p*-mediano (the median and plant location models), 2) problemas de localización de *p*-centro y de cobertura (the center and covering location models).

Para centrar la cuestión, realizaremos un pequeño resumen de los modelos de localización que han sido el “corazón” de multitud de análisis de localización en un gran número de disciplinas, para posteriormente detallarlos en profundidad. Estos son: el problema del *p*-mediano, el problema del *p*-centro, problemas de *cobertura* y problemas de *costes fijos* (capacidad limitada e ilimitada). El problema **p-mediano** (o también conocido como *minisum* o problema de Weber) consiste en localizar *p* instalaciones en *p* localizaciones minimizando un criterio de coste. Este puede ser definido en términos de tiempo, dinero, número de viajes, distancia total, y otros. Además este problema puede llevar asociado un peso en los puntos de demanda (demanda ponderada), significando que no todos los puntos de demanda contribuyen igual en la función objetivo. El problema **p-centro**, trata de localizar *p* instalaciones con el objetivo de minimizar la máxima distancia entre cualquier instalación y el punto de demanda asignado. Este modelo se utiliza para localizar servicios de emergencia tales como, parques de bomberos, ambulancias o comisarías de policía. Otros modelos son formulados en función de la demanda cubierta. Es el caso de los problemas de localización con **cobertura**, donde el punto de demanda *i* puede ser cubierto por la instalación en el punto *j* si la distancia (o tiempo, u otros) entre ambos es menor que *R* (valor predeterminado), la cual se conoce como cobertura. El objetivo es maximizar la demanda a cubrir a partir de un cierto número de instalaciones de entre un conjunto de lugares candidatos, o en el caso del problema de cobertura de conjunto, se intenta minimizar el número de instalaciones necesarias para cubrir toda la demanda sin una distancia específica. Y, por último, tenemos el problema de localización con **costes fijos**, en el cual se incorpora un coste específico de localizar la instalación (puesta en marcha) diferente en cada una de ellas, pero el objetivo sigue siendo un *minisum*. En los modelos anteriormente vistos, se considera un dato conocido el número de instalaciones a ser localizadas, contrariamente a lo que ocurre en este modelo, en el cual se determinará de modo que se minimicen los costes. Aquí diferenciaremos entre, el problema de localización de capacidad ilimitada y el problema de localización de capacidad limitada. En este último se requeriría que la demanda fuera abastecida por más de una instalación.

La clasificación anterior ha sido la más habitual en la literatura, detallándose cada uno de los modelos incluso en capítulos enteros de libros, debido a que han sido durante décadas los más comúnmente utilizados. Pero en la actualidad existen otros modelos de localización que abordan determinados problemas de una manera más realista, siendo éstos una extensión de los modelos básicos mencionados. Este es el caso de problemas multiobjetivo, problemas de localización de instalaciones con jerarquías, problemas de asignación de rutas, problemas de localización hub, modelos de dispersión, sistemas de flujo multiproducto, etc. Estos modelos los trataremos al final de este apartado, además de algunas de las aplicaciones llevadas a cabo.

A continuación, se presenta la clasificación según Bosque Sendra (Bosque 2004) de los modelos de localización óptima más extendidos, diferenciando entre aquellos que se utilizan para ubicar instalaciones deseables, tales como equipamientos educativos,

sanitarios, comerciales, de ocio, deportivos, culturales, etc., y los que tratan instalaciones catalogadas como molestas o perjudiciales, como vertederos, fábricas contaminantes, incineradores químicos, plantas de almacenamiento de residuos radiactivos, etc. Esta es una clasificación bastante común actualmente y existen numerosos estudios enmarcados en ambos grupos, tales como los llevados a cabo por A. Moreno (Moreno-Jimenez A. 2003) donde presenta una aproximación a partir de dos problemas de localización para modelar el impacto del ruido producido por el paso de los aviones en áreas residenciales colindantes a un aeropuerto. Otro ejemplo reciente es el descrito por Sorensen y Church (Sorensen P. 2010) referente al problema de la localización de servicios médicos de emergencias donde presentan el LR-MEXCLP, un híbrido entre el conocido modelo MEXCLP (maximum expected covering location mode) y el MALP (maximum availability location problema) de ReVelle y Hogan. Una muestra más de instalaciones no deseables es la localización de vertederos municipales (Mena Frau 2006; Sumathi 2008), y en esta línea tenemos el estudio de Erkut et al. (2006) orientado a la gestión de residuos sólidos en la región central de Macedonia (Grecia). En el artículo se describe el desarrollo de un modelo a partir de programación lineal mixta-entera multiobjetivo, para resolver un problema de localización de instalaciones, incluyendo la selección de estaciones de transferencia, instalaciones de recogida de materiales, incineradores, y el vertedero controlado, además de tener en cuenta los criterios económicos y ambientales.

Muñoz y Saameño (Muñoz-Pérez 1999) desarrollaron el problema de la localización de instalaciones indeseables en una región poligonal con áreas prohibidas, aplicando los criterios de maximin (maximizar la mínima distancia con respecto a otras instalaciones, como centros de población) o de maxisum (la localización de la instalación no deseable maximiza la suma de las distancias desde dicha instalación a otras existentes), usando las distancias euclídeas, y encontrando una solución óptima dentro de un conjunto finito de puntos.

Pero, además de estos dos tipos en los que hemos dividido las instalaciones (deseables y no deseables), existe otro grupo, cada vez más numeroso en nuestras sociedades modernas, donde dichas instalaciones ofrecen servicios y beneficios a sus usuarios, pero provocando al mismo tiempo efectos adversos, disminuyendo así la calidad de vida en las poblaciones cercanas. Estas son las denominadas instalaciones semi-deseables (Bringberg 1998), incluyendo, por ejemplo, plantas de industrias químicas, plantas de residuos sólidos urbanos u otros tipos, aeropuertos, antenas/receptores para telecomunicaciones, etc.

Dentro de esta clasificación de instalaciones semi-deseables se diferencia entre, según la terminología anglosajona, las denominadas “obnoxious facilities”, que generan una amenaza al estilo de vida o disfrute de amenidades, y “noxious facilities”, que suponen una amenaza en la salud y bienestar. Los comúnmente utilizados modelos en la teoría de la localización, Minimax y Minisum, son inapropiados para utilizarlos en estas instalaciones por dos motivos. Por un lado, ambos modelos intentan que la nueva instalación esté ubicada lo más cerca posible de los puntos de demanda, lo que en este caso se estarían obviando los efectos adversos y molestos que producen. Por otro lado, si se utilizaran modelos de instalaciones indeseables, como el Maximin o el Maxisum, entonces estas instalaciones semi-deseables, se localizarían tan lejos como fuera posible de los puntos de demanda, con lo que el coste económico aumentaría considerablemente.

El siguiente esquema muestra la clasificación de los modelos de localización más destacados, divididos en las tres categorías mencionadas (Bosque 2004; Daskin 1995).

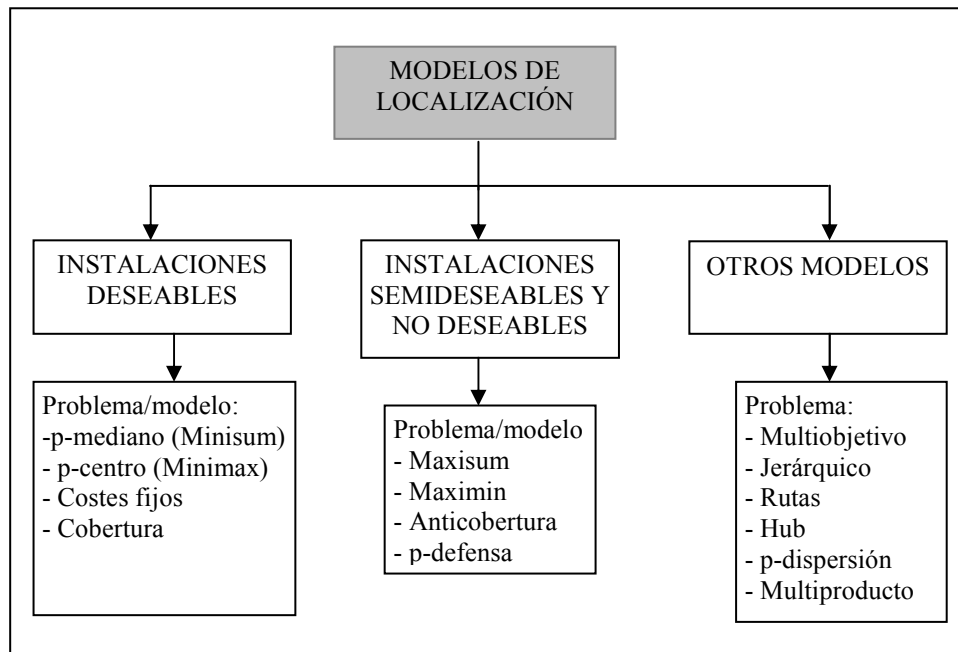


Figura 10. Clasificación de modelos y problemas de localización de instalaciones. Fuentes: (Bosque 2004; Daskin 1995)

### 3.2.5. Modelos de localización: Instalaciones deseables

Este tipo de modelos persiguen resolver un doble problema, es decir, por un lado determinar la localización óptima de equipamientos/instalaciones, y al mismo tiempo asignar la demanda (posibles consumidores o usuarios), por los que comúnmente se les denomina problemas de localización-asignación. No obstante, dependiendo del objetivo que se persigue, definiremos unos u otros, aunque un gran número de estudios corroboran el problema de optimización centrado en la reducción al mínimo de los costes de desplazamiento. A continuación se muestra un esquema de la clasificación exponemos cada uno de los modelos.

#### 3.2.5.1. El problema del p-mediano (Minisum o problema de Weber)

El principio de p-mediano (conocido también como Minisum) debe enmarcarse en un espacio discreto, donde la red de transporte está formada por arcos y nodos, y donde para calcular el coste de transporte la distancia no se calcula en línea recta, sino que se emplea algún algoritmo de caminos mínimos a través de las vías de transporte existentes y ponderar la distancia. El objetivo de este modelo es minimizar el coste de transporte obteniendo el mejor emplazamiento para las nuevas instalaciones, y garantizar que los puntos de demanda son abastecidos por la instalación más cercana.

Este principio tiene en cuenta en su formulación tanto el número de equipamientos/instalaciones a localizar como el desplazamiento total, siendo este último concepto el más importante, es decir, se busca minimizar los costes totales de desplazamiento, de tal modo que se podría enunciar de la siguiente manera: *dado un número de equipamientos a instalar, determinar de entre los emplazamientos candidatos, aquellos que minimicen el desplazamiento total de los consumidores, asignándoles el más cercano*. La formalización del principio del minisum, mediante programación matemática, para minimizar el valor Z en la función objetivo será:

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_i t_{ij}^{\beta} x_{ij} \quad \text{Ec. 5}$$

donde,

$i=1, \dots, m$  es el índice de los puntos de demanda.

$j=1, \dots, n$  es el índice de los sitios candidatos para acoger instalaciones.

$d_i$  es la demanda en el lugar  $i$  (variable conocida).

$t_{ij}$  coste de transporte (en función de la distancia) del punto de demanda ubicado en  $i$  al equipamiento ubicado en  $j$  (variable conocida). El exponente  $\beta$ , es normalmente uno, aunque puede variar en el caso de una no linealidad entre en coste de transporte y la distancia. Esta distancia normalmente es calculada en línea recta, mediante el teorema de Pitágoras o Manhattan, o a través de la red.

$k$  es el número de equipamientos a instalar.

$x_{ij}$  es la proporción de la demanda de  $i$  asignada al centro  $j$  (tomará el valor 1 si es el centro más próximo y 0 sino lo es). Esta es una variable que será determinada durante el cálculo, es lo que se denomina *variable de decisión*, y se representa mediante una matriz compuesta por unos y ceros.

Para resolver la formulación anterior se hace necesario establecer una serie de condiciones. La primera impone que para cada lugar de demanda la variable  $x_{ij}$  debe tener solo un valor igual a la unidad. La segunda, introduciendo una variable adicional  $y_j$  (serán las incógnitas que se han de resolver, por lo tanto se trata de otra variable de decisión), cuyo valor será exactamente el de  $k$ . La última exige que un punto de demanda solo pueda ser asignado a un lugar  $j$  que sea equipamiento. De modo que las expresiones quedarían:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad \forall i = 1, \dots, m$$

$$\sum_{j=1}^n y_j = k, \quad \text{donde } y_j \in \{1,0\}, \forall j = 1, \dots, n$$

$$0 \leq x_{ij} \leq y_j, \quad \forall i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n$$

Un ejemplo de este problema de localización para instalaciones semi-deseables lo presentaron Bringberg y Juel (Bringberg 1998) en un estudio donde el modelo aplicado

es el minimax. La particularidad de este estudio es que se emplean dos distancias, una general en la función objetivo para calcular los costes totales de transporte, y otra arbitraria en el conjunto de condiciones, que mide la distancia entre la instalación y su centro de demanda. Esta distancia de separación introduce la denominada “región prohibida” que se determina mediante un círculo cuyo centro es cada punto de demanda y en cuya área generada no podrán ser localizadas las nuevas instalaciones.

Una variante del principio del p-mediano podemos encontrarla en (Drezner 1994) donde la diferencia fundamental radica en que en la zona bajo estudio ya existen otras instalaciones a tener en cuenta en el momento de localizar las nuevas. Este es el denominado p-mediano condicional.

### 3.2.5.2. El problema p-centro (Minimax)

Este problema p-centro (conocido también como Minimax) tiene como objetivo minimizar la máxima distancia entre los puntos de demanda y las instalaciones (Bosque Sendra 2004). Este modelo está directamente relacionado con la equidad de la accesibilidad espacial, es decir, encontrar que la accesibilidad entre los distintos lugares sea lo menos desigual posible, y conseguir, por tanto, que los que se encuentran más alejados de las instalaciones no se vean perjudicados por ello.

Este principio podemos enunciarlo como: *dado un número limitado de equipamientos a instalar, obtener el conjunto de los cuales minimizan la distancia o desplazamiento máximo, asignando la demanda al centro más próximo.* Una vez enunciado, la formalización de este modelo de localización se constituye por una función objetivo que busca identificar y reducir al mínimo la máxima distancia ponderada con la demanda del lugar más perjudicada, considerando los m puntos de demanda existentes. Por tanto la formulación sería:

$$\text{Minimizar } Z = \text{Max}_{i=1,\dots,m} d_i t_{ij} x_{ij} \quad \text{Ec. 6}$$

donde,

$i=1, \dots, m$  es el índice de los puntos de demanda.

$j=1, \dots, n$  es el índice de los sitios candidatos para acoger instalaciones.

$d_i$  es la demanda en el lugar  $i$  (variable conocida).

$t_{ij}$  coste de transporte del punto de demanda ubicado en  $i$  al equipamiento ubicado en  $j$

$k$  es el número de equipamientos a instalar

$x_{ij}$  es la proporción de la demanda de  $i$  que será cubierta por la instalación en el nodo  $j$  (tomará el valor 1 si se localiza en el sitio candidato  $j$ , y 0 sino lo es).

sujeto a las siguientes condiciones:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad \forall i = 1, \dots, m$$

$$\sum_{j=1}^n y_j = k, \quad \text{donde } y_j \in \{1,0\}, \forall j = 1, \dots, n$$

$$0 \leq x_{ij} \leq y_j, \forall i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n$$

Sin embargo, Suzuki y Drezner (Suzuki 1996) convierten el espacio discreto en un área continua de demanda<sup>13</sup>, donde dicha área queda cubierta por círculos (cuyo centro son las instalaciones) con el menor radio posible. Es frecuente utilizar el modelo p-centro para problemas de localización de instalaciones de emergencia, tales como bomberos, hospitales, ambulancias, así como para estaciones de radiotelevisión, sistemas de aspersión, antenas de telecomunicaciones, etc., donde el objetivo es minimizar la distancia al punto de demanda más alejado. En este estudio, además, los autores proponen una solución heurística basada en los polígonos de Voronoi.

### 3.2.5.3. La maximización de los beneficios. Costes fijos de una instalación

Se trata de un modelo más completo que los dos anteriores puesto que no contempla únicamente los costes fijos de las instalaciones sino también los costes variables derivados del transporte y la producción. Es uno de los problemas de localización de instalaciones con capacidad ilimitada (UFLP, uncapacitated facility location problem), mediante el cual puede determinarse el número, el tamaño y la localización de instalaciones minimizando los costes exigiendo satisfacer la demanda. La formulación de este modelo quedará de la siguiente manera:

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_i (v_j + t_{ij}^\beta) x_{ij} + \sum_{j=1}^m f_j y_j \quad \text{Ec. 7}$$

donde,

$d_i$  es la demanda en el lugar  $i$ .

$v_j$  coste de producción en la instalación  $j$  (coste por unidad de distancia por unidad de demanda).

$t_{ij}$  coste de transporte del punto de demanda ubicado en  $i$  al equipamiento ubicado en  $j$ .

$x_{ij}$  es la proporción de la demanda en el nodo  $i$  servida por la instalación en el nodo  $j$  (variable de decisión).

$f_j$  es el coste fijo de la instalación en el lugar  $j$ .

$y_j$  variable de decisión que toma valores 0 ó 1.

sujeto a las siguientes condiciones:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad \forall i$$

$$x_{ij} \leq y_j \quad \forall i, j$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad \forall i, j$$

$$y_j = 0, 1 \quad \forall j$$

---

<sup>13</sup> Este caso podría ser la única manera de tratar un problema donde el número de puntos de demanda es muy alto y no puede ser resuelto de manera discreta



donde la función objetivo minimiza los costes totales, suma de los costes fijos y la distancia total (ponderada por la demanda) multiplicada por el coste por unidad de distancia por unidad de demanda. La primera restricción exige que cada nodo de demanda  $i$  tiene que ser servido. La segunda dice que la demanda en el nodo  $i$  no puede ser asignada al lugar candidato  $j$  a menos que localicemos a una instalación en el nodo  $j$ . La tercera y la cuarta son las restricciones de integridad y de no negatividad. Puesto que las instalaciones son de capacidad limitada, toda la demanda en el nodo  $i$  será asignada a la más cercana instalada.

Del mismo modo se formularia el problema de localización de instalaciones con capacidad limitada, incluyendo un nuevo parámetro que es la capacidad de la instalación,  $k_j$ , variante que se diferencia principalmente de la anterior al aplicar la restricción:

$$\sum_{i=1}^n d_i x_{ij} \leq k_j y_j \quad \forall j$$

se asegura que el nodo de demanda  $i$  no está asignado al lugar candidato  $j$  sino que se ha seleccionado el lugar candidato  $j$ .

#### 3.2.5.4. *Problemas de localización con cobertura*

Para determinados tipos de problemas de localización de instalaciones, se da el caso de que no es la solución óptima aquello que se busca, sino la que satisface al conjunto, y por lo tanto la demanda (población) goza de un nivel de accesibilidad aceptable. Por ejemplo el problema de máxima cobertura y sus variantes ha sido frecuentemente aplicado a servicios de emergencias (Mandell 1998). Normalmente, este tipo de problemas se ven materializados mediante la utilización de un radio (en ocasiones, como veremos, de dos, uno como límite superior y otro inferior) que actúa como distancia haciendo que la población quede contenida dentro del mismo. Esto nos lleva a la noción de **cobertura**. Este concepto tiene varias vertientes, destacando entre ellos los más relevantes como, el problema de cobertura de conjunto, cobertura máxima, cobertura máxima con restricciones.

#### **Problemas de localización de Cobertura de conjunto (the set covering model)**

Este es el modelo más sencillo de localización de instalaciones y fue planteado por primera vez por Hakimi (1964) y posteriormente formulado mediante programación lineal por Toregas en los años setenta. El objetivo es encontrar en coste mínimo (representado por el número de instalaciones) de un conjunto de instalaciones elegidas de entre un conjunto finito de instalaciones candidatas de modo que cada punto de demanda esté cubierto por al menos una instalación (primera condición) dentro de un radio de distancia predefinido. La formulación matemática sería:

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{j=1}^m f_j y_j \quad \text{Ec. 8}$$

donde

$f_j$  es el coste de localizar una instalación en el lugar candidato  $j$ ;

$y_j$  variable de decisión que toma valores 1 ó 0; siendo 1 si la instalación se localiza en el lugar candidato  $j$ , y 0 en el otro caso;

sujeta a las siguientes condiciones:

$$\sum_{j=1}^n y_j \geq 1 \quad \forall j;$$

$$y_j = 0,1 \quad \forall j.$$

**Problemas de localización de Cobertura Máxima (the maximun covering location model)**

En este modelo, el punto esencial es la demanda, a diferencia del modelo anterior donde los puntos de demanda son tratados de igual manera, es decir, tienen el mismo peso. Además, el número de instalaciones a localizar es fijado previamente, así como la distancia máxima recomendado. Con estas consideraciones podríamos enunciar este modelo del siguiente modo: *dado un número de instalaciones a ubica, averiguar, de entre los emplazamientos posibles, el conjunto que maximice en número de usuarios dentro de un radio de distancia, asignando siempre la distancia al centro más próximo* (Church 1974). La función objetivo sería:

$$\text{Maximizar } Z = \sum_{i=1}^m d_i x_{ij} \quad \text{Ec. 9}$$

donde,

$i=1, \dots, m$  es el índice de los puntos de demanda.

$j=1, \dots, n$  es el índice de los sitios aptos para acoger equipamientos.

$d_i$  es la demanda en el lugar  $i$  (variable conocida).

$x_{ij}$  es la variable de decisión (tomará el valor 1 si el punto de demanda queda cubierto y 0 en caso contrario).

Como se desprende de la formulación, se asume que la cobertura es binaria, es decir, o la demanda queda totalmente cubierta, o no. Pero esta suposición, en muchas aplicaciones es poco realista. Por ello, Berman y Krass (Berman 2002) presentan un problema de localización de cobertura máxima generalizado el cual permite una cobertura parcial (valores intermedios) de la demanda, e ignorando el aspecto competitivo. Demuestran que este problema es equivalente al problema de localización de instalaciones con capacidad ilimitada pero sin tener en cuenta los costes fijos.

### 3.2.6. *Modelos de localización: Instalaciones no deseables*

Debido a la creciente preocupación por el medioambiente, el interés social y político por proteger y salvaguardar espacios naturales, así como por la planificación territorial y ordenación del territorio, la teoría de localización de instalaciones, sobre todo las consideradas como nocivas, indeseables o peligrosas, ha cobrado una gran importancia. Ya no se trata únicamente de responder cuestiones de cual es el mejor emplazamiento para una cierta actividad, equipamiento o instalación, sino además equilibrar el concepto del bienestar social con el del malestar provocado por la búsqueda y localización práctica de ciertas actividades de explotación, transformación o consumo humano, que habitualmente, la propia sociedad rechaza siendo éstas necesarias. Por ello, la convergencia entre la teoría de la localización y un gran número de disciplinas (geografía, derecho, política, gestión, medio ambiente, etc.) es cada día más evidente (Moreno-Jimenez 1999).

En particular, hemos mencionado anteriormente el grupo de modelos correspondientes a instalaciones semi-deseables, cuyo modelo de localización más estudiado y aplicado es el Maximin (cuyo objetivo es maximizar la mínima distancia entre la población existente y la instalación), pero existen un amplio espectro de modelos que, dependiendo del objetivo buscado, pueden ser perfectamente útiles para la resolución de un problema de localización, como vemos en J. Fernández (2000). Este artículo se ocupa de instalaciones que aún no siendo perjudiciales ni peligrosas como una planta de tratamiento de aguas o una central de bioenergía, son rechazadas por los habitantes de una región determinada (catalogadas como semi-deseables). El objetivo principal es minimizar la repulsión global de los habitantes de dicha región teniendo en cuenta cuestiones medioambientales. Para ello, desarrollaron un modelo matemático basado en un algoritmo de análisis de intervalos, el cual puede ser aplicado para resolver cualquier tipo de problema de localización continuo.

Para formular los modelos de localización de este tipo de instalaciones previamente se deben tener en cuenta dos principios básicos, de eficiencia y equidad, que permitan determinar la ubicación más adecuada para dichas instalaciones. En primer lugar, la **eficiencia espacial**, relacionada íntimamente con los costes, así como de las molestias que ocasionan a la población afectada. Por ello, estas instalaciones se intentan localizar en aquellas ubicaciones que determinen un coste<sup>14</sup> mínimo en la construcción y del mantenimiento, tratamiento y uso cotidiano, por ejemplo, minimizando los desplazamientos mediante camiones y maquinarias pesadas, que provocan contaminación y ruidos (Bosque 2002).

En segundo lugar, la **justicia espacial**, que hace referencia al grado de igualdad de la distribución de las instalaciones no deseables en una determinada región, asegurándose la no concentración de un número excesivamente alto de las mismas en dicha región para garantizar, al mismo tiempo, que las molestias y riesgos también se repartan equitativamente entre las poblaciones bajo estudio (Bosque Sendra 2006). Por consiguiente, la distancia entre instalaciones y poblaciones no debería ser excesivamente diferente.

---

<sup>14</sup> Costes económicos o de otro tipo

A continuación, veremos los modelos para la localización de instalaciones “noxious o obnoxious” comentado anteriormente. Ejemplo de ello serían residuos peligrosos, vertederos, residuos sólidos urbanos, etc., donde nos gustaría encontrar las localizaciones que tan lejos de la población como sea posible. Esta petición por parte de la población se conoce con el nombre de NIMBY (Not in my back yard).

### 3.2.6.1. *El problema del Maxisum*

Este problema trata de buscar soluciones a problemas de localización donde el objetivo que se desea alcanzar es el de minimizar los efectos negativos o perjudiciales que provoca dicha instalación en la población. Para conseguir que el impacto global sea el menor posible es necesario considerar tanto las distancias como la población que va a verse afectada. Según esto podríamos enunciarlo de la siguiente manera (Daskin 1995): *Dado un número de instalaciones a ubicar, averiguar, de entre los emplazamientos posibles, el conjunto que maximizaría la distancia entre las instalaciones y las poblaciones (ponderando la distancia con la población) asignando cada lugar a la instalación más próxima.*

Este es un problema idéntico al p-mediano solo que en lugar de minimizar la distancia, en el caso del Maxisum se maximiza. Matemáticamente hablando, esto no implica únicamente cambiar la función objetivo en el modelo, puesto que si fuera así no garantizaría que la demanda sería asignada a la instalación más cercana. La función objetivo quedaría<sup>15</sup>:

$$\text{Maximizar } Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_i t_{ij} x_{ij} \quad \text{Ec. 10}$$

donde,

$i=1, \dots, m$  es el índice de los puntos de demanda.

$j=1, \dots, n$  es el índice de los lugares candidatos.

$d_i$  es la demanda en el lugar  $i$  (variable conocida)

$t_{ij}$  coste de transporte del punto de demanda ubicado en  $i$  al equipamiento ubicado en  $j$  (variable conocida).

$x_{ij}$  es la variable de decisión que tomará el valor 1 si el punto de demanda queda cubierto por la instalación en el nodo  $j$ ; y 0 en caso contrario.

$y_j$  es la variable de decisión que toma el valor 1 si la instalación se localiza en el sitio candidato  $j$ ; 0 en otro caso.

$k$  número de instalaciones a localizar

---

<sup>15</sup> Ejemplo practico en la pagina 368 del libro de M.S. Daskin “Network and discrete location”

sujeto a las siguientes condiciones:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad \forall i$$

$$\sum_{j=1}^n y_j = k$$

$$x_{ij} \leq y_j \quad \forall i, j$$

$$x_{ij} = 0,1 \quad \forall i, j$$

$$y_j = 0,1 \quad \forall j$$

### 3.2.6.2. *El problema de Maximin*

En este caso, la cuestión principal se ha centrado en obtener la mínima distancia desde la instalación indeseable y cualquier población susceptible de ser afectada, es decir, que la distancia mínima sea la máxima posible, haciendo así que los más afectados lo sean de la menor manera. A propósito de este principio se han formulado dos variantes, las cuales se diferencian únicamente si la distancia se pondera por la población o no. De modo que la función objetivo quedaría:

$$\text{Maximizar } F = \text{Min}_{i=1, \dots, m} w_i t_{ij} x_{ij} \quad \text{Ec. 11}$$

donde  $w_i$  es el peso otorgado a cada población.

Un ejemplo del problema de instalaciones no deseable y con máxima cobertura lo encontramos en Plastría y Carrizosa (Plastría 1999), donde el objetivo pasa por minimizar el total de la población afectada por la instalación, el cual se denomina problema de cobertura mínima. En este estudio tienen en cuenta dos medidas fundamentales. Por un lado normativas legales y umbrales de distancias (zonas de influencia) enmarcadas normalmente en una planificación territorial que restringirá los lugares candidatos para ubicar una instalación no deseable, añadiendo la topografía, geología y meteorología de la zona. Estas consideraciones hacen que el área adopte formas irregulares haciendo su resolución matemática más compleja. Por otro lado, la intensidad de los efectos indeseables sobre la población. Para cumplir con estas premisas se desarrolla un sencillo algoritmo para obtener la solución más eficiente, terminando con un análisis de sensibilidad.

### 3.2.6.3. *El problema de anti-cobertura (the anti-covering location problem)*

Este modelo tiene en cuenta directamente el hecho de que dada una instalación, existen poblaciones que quedan afectadas por dicha instalación no deseable y por tanto, por sus molestias, riesgos e impactos. En la práctica, se buscaría la localización que provoque

menos perjuicio a esas poblaciones, introduciendo un nuevo elemento: definir una zona de riesgo o de exclusión alrededor de cada instalación que entrará a formar parte en la localización de las instalaciones óptimas, de una de las siguientes maneras:

*Minimizar la población global cubierta:* dado un número de instalaciones a ubicar y de lugares candidatos a acogerlas, averiguar el conjunto de ellos que minimizaría la población dentro de un radio de distancia determinado de una o más instalaciones.

*Minimizar la población global cubierta con restricción de multicobertura:* dado un número de instalaciones a ubicar y de lugares candidatos a acogerlas, averiguar el conjunto de ellos que minimizaría la población dentro de un radio de distancia determinado de cómo máximo una instalación. Esta restricción garantiza que ninguna población se vea afectada por más de una instalación, y por lo tanto, los perjuicios y riesgos son repartidos de forma más equitativa.

El problema de anti-cobertura ha sido aplicado a muy diversas áreas, sobre todo referentes a planificación territorial, abarcando desde planificación de usos del suelo (gestión forestal) a localización de instalaciones tales como las militares. Este problema pretende garantizar la dispersión y separabilidad entre instalaciones (Murray 1996).. Murray y Church examinan el desarrollo de dos tipos de problemas de anti-cobertura basados con relajación lagrangiana, demostrando la efectividad computacional del heurístico superando las restricciones de origen espacial. No obstante, la formulación básica de este problema sería:

$$\text{Maximizar } Z = \sum_{i=1}^m c_i x_i \quad \text{Ec. 12}$$

donde,

$i=1, \dots, m$  es el índice de los puntos de demanda;

$c_i$  son los beneficios obtenidos en la localización  $i$ ;

$d_{ij}$  es la distancia más corta desde la localización potencial  $i$  a la potencial  $j$ ;

$R$  es la restricción de la distancia, es decir, dos instalaciones no pueden encontrarse a una distancia  $<$  que  $R$ ;

$n_i \{ d_{ij} \leq R \text{ y } i \neq j \}$ ;

$n_i$  es el coeficiente mínimo necesario para imponer restricciones locacionales;

$x_i$  variable de decisión que toma valores 1 ó 0; siendo 1 si la instalación se localiza en el lugar candidato  $i$ , y 0 en el otro caso;

sujeta a las siguientes condiciones:

1. prohibido localizar dos instalaciones en un radio  $R$   $n_i x_i + \sum_{j \in N} x_j \leq n_i \forall_i$  ;

2. Condición de integridad  $x_i = 0,1 \quad \forall_i$ .

**3.2.6.4. Modelos de dispersión para la localización de instalaciones no deseables**

En los problemas y modelos vistos anteriormente en instalaciones deseables era siempre mejor localizar las instalaciones cerca de la demanda. Este problema difiere de los anteriores en dos aspectos. Primero, tiene en cuenta sólo la distancia entre nuevas instalaciones. Segundo, el objetivo es maximizar la mínima distancia entre cualquier par de instalaciones. Un ejemplo de aplicación sería una base militar, donde aumentando la separación se complica el ataque a ambas bases, o la localización de almacenes (tiendas) de la misma compañía. Este modelo se enuncia del siguiente modo (Daskin 1995; Suzuki 1996): *Dado un número de instalaciones a ubicar y de un determinado número de lugares candidatos a acogerlas, determinar el conjunto de ellos que maximizaría la distancia mínima entre cualquier par de instalaciones.*

**3.2.6.5. El problema p-defensa**

Este modelo tiene como objetivo minimizar las distancias entre instalaciones, es decir, no contemplan la interacción entre instalación y población afectada. Se enunciaría de la siguiente manera (Daskin 1995): *Dado un número de instalaciones a ubicar y de un determinado número de lugares candidatos a acogerlas, determinar el conjunto de ellos que maximizaría la suma o media de las distancias entre todas las instalaciones.* La función objetivo quedaría:

$$\text{Maximizar } F = \sum_{j=1}^n \sum_{h>j}^n t_{jh} y_j \quad \text{Ec. 13}$$

donde  $t_{jh}$  es la distancia entre las instalaciones ubicadas en  $j$  y  $h$

**3.2.7. Extensión de los modelos de localización básicos**

**3.2.7.1. Problemas de localización multiobjetivo (Multiobjective models)**

Dado que la localización de una instalación posee una componente estratégica y temporal (a largo plazo) en la mayoría de los casos, es posible que en el planteamiento de un problema entren en conflicto o compitan diferentes objetivos que deban ser considerados. De modo que, en primer lugar se debe analizar cual es el objetivo que se desea priorizar con la finalidad de buscar la solución óptima, por ejemplo, minimización de los costes, maximización de la demanda, o los beneficios, minimización del tiempo, etc., y traducirlo a la correspondiente formulación matemática. Y en segundo lugar, cuantos objetivos van a entrar en conflicto, complicando la resolución del problema, al aumentar el número de los mismos, pero al mismo tiempo haciendo más realista el problema y solución.

Current et al. (1990) hace una revisión de la amplia y multidisciplinar literatura que se ocupa de este aspecto, clasificándola en cuatro grandes grupos. El grupo mayoritario fue aquel en el que el objetivo a minimizar es el coste (incluyendo minimizar la distancia).

El segundo objetivo más comúnmente utilizado está referido a la demanda (cobertura de la demanda, o asignación de la demanda). Y, un menor número de artículos se refieren al tercer y cuarto grupo, donde el objetivo dominante es, en un caso maximizar los beneficios, y en el último el respeto por el medio ambiente.

### **3.2.7.2. Problemas de localización de instalaciones con jerarquías (*Hierarchical facility location models*)**

Existen instalaciones estructuradas en niveles, es decir, que no son homogéneas en cuanto al servicio que ofrecen, ofreciendo diversos tipos de servicio. Este es el caso, por ejemplo, del sistema escolar, dividido en preescolar, primaria y secundaria, o el servicio de correos desde el nivel más bajo que sería el propio buzón, o el sistema sanitario en países desarrollados, desde la clínica como nivel inferior hasta hospitales como nivel superior.

La mayoría de los problemas con jerarquías han sido planteados como una variante del modelo clásico p-mediano (minisum) y modelos con cobertura (para ver formulación (Daskin 1995)). Sahin y Süral (Sahin 2007) nos presenta una extensa revisión de los tipos de modelos con jerarquías y las aplicaciones más recientes de los mismos, clasificados según la relación entre los consumidores y la instalación, disponibilidad del servicio en cada nivel y la configuración espacial de éstos. En Galvao (2002) vemos un claro ejemplo de este tipo de problemas enmarcado en el sistema de maternidad de Río de Janeiro, dividido en tres niveles: unidades básicas, casas de maternidad y clínicas de neonatos, con la finalidad de reducir la mortalidad. Para resolver el modelo jerárquico utilizaron la relajación lagrangiana y un heurístico, concluyendo que no existe una diferencia significativa utilizando uno u otro al aplicarlos al caso de estudio de la población de 1995. Otro estudio de problemas de localización con jerarquías es llevado a cabo por J.M. Lee y Y.M. Lee (Lee 2010) donde se plantea la formulación mediante programación entera mixta y se resuelve dicho modelo utilizando el heurístico de la búsqueda prohibida (Tabu search), con la particularidad de que consideran una cobertura parcial para distancias comprendidas entre la distancia mínima y la distancia máxima.

### **3.2.7.3. Problemas de asignación de rutas (*Locating-Routing models*)**

En los modelos básicos discutidos anteriormente se asume que una instalación (o varias) cubre las necesidades de la demanda. Sin embargo, en otro tipo de problemas las instalaciones producen operaciones de recogida/distribución donde la demanda es cubierta por rutas de entrega o recogida. En estos casos, el factor destacable es la eficiencia global al ubicar la instalación, que no depende solo de la distancia a la demanda sino también de la eficiencia del vehículo que se utilice en las rutas diseñadas. Son los denominados problemas de asignación de rutas, los cuales implican tres decisiones fundamentales interrelacionadas: 1) localizar la instalación, 2) asignar la demanda a las instalaciones, y 3) trazar la ruta de los vehículos para cubrir la demanda. Ejemplos de este tipo de problemas podría ser la recogida de residuos sólidos urbanos en una ciudad, centros de distribución o rutas de reparto.



#### 3.2.7.4. *Problemas de localización hub (Hub location problems)*

Muchos sistemas de transporte logísticos emplean el término “hub and spoke”<sup>16</sup> como método para distribuir mercancías (o personas) utilizando vehículos de grandes capacidades por tierra, mar o aire, o vehículos muy rápidos, como el caso de aviones, y realizar grandes distancias desde un punto origen a muchos destinos. La mayoría de los modelos formulados para localizar el hub y sus rutas de distribución intentan minimizar el coste total (como una función de la distancia). El modelo de localización p-hub básico, puede ser formulado empleando la notación que se expone en Current (2001).

#### 3.2.7.5. *Sistemas de flujo multiproducto*

En este tipo de problemas, en lugar de demanda múltiple encontramos múltiples productos, siendo producidos en una cadena de manufacturación. Las principales premisas a tener en cuenta son: 1) número de almacenes, 2) localización de estos almacenes y 3) proceso del producto (flujo) a través del sistema. Implícitamente, en el punto 3) nos encontraríamos con dos decisiones importantes, y serían qué tipo de planta y qué mercado acogería dichos productos. En la obra de M.S. Daskin (1995) se formula un problema de este tipo asumiendo que los almacenes no tienen límites de capacidad.

#### 3.2.8. *La integración de los SIG en la localización de instalaciones*

Actualmente, la realización de análisis de localización de instalaciones/actividades mediante Sistemas de Información Geográfica es una práctica bastante extendida. Esto ha sido debido a los enormes avances que han sufrido los SIG, la disponibilidad de los datos para su aplicación real y la implementación de los modelos matemáticos necesarios en este ámbito. Los SIG son una herramienta adecuada para análisis de localización por muchos de los elementos que integra y son necesarios para tal fin, tales como las coordenadas de cualquier elemento, atributos alfanuméricos, representaciones gráficas, análisis espaciales, etc. Sin embargo, todavía en la actualidad los SIG poseen deficiencias para cubrir las exigencias de las modernas técnicas de localización. La constatación de estas insuficiencias ha llevado a plantear la ampliación y mejora de las técnicas de los SIG para adecuarlas a la operabilidad de estas teorías, e incluso se ha desarrollado el denominado Sistema de Ayuda a la Decisión Espacial (SADE).

Además, se ha hecho un esfuerzo por integrar las teorías y cálculos matemáticos para salvar los diferentes obstáculos que presentaban los SIG creando otros software específicos para análisis de localización, como el denominado LOCALIZA (Bosque 2004). Tenemos un ejemplo concreto en el estudio presentado en las I Jornadas de SIG libre donde se describe la utilidad y funcionalidad de dicha herramienta para resolver y analizar problemas de localización óptima de instalaciones (Bosque 2007).

Sin embargo, los avances que se están realizando son significativos y merecen de nuestro interés por dos razones fundamentalmente. La primera, porque parece que avanzan por el

---

<sup>16</sup> Sería el esquema de vuelos de una aerolínea, por ejemplo, donde el centro es la base y, desde él, se extienden un gran número de rutas hacia todas las direcciones.

camino adecuado para la toma de decisiones, y en segundo lugar porque la utilización de estos recursos parecen legítimos siempre que se tomen los resultados como aproximaciones parciales a la solución. Por todo ello, cabe afirmar, que los modelos de optimización espacial pueden ser de indudable utilidad para diversos fines.

Los modelos de localización-asignación, en su nomenclatura general constituyen un conjunto de modelos matemáticos que se han ido incluyendo en los SIG incorporados como un análisis de redes, como hemos apuntado anteriormente. Su objetivo puede ser sintetizado como encontrar la mejor localización, es decir, la **óptima** de cualquier fenómeno, que generalmente suelen ser servicios, instalaciones o actividades. Un gran número de ejemplos prácticos y aplicaciones tales como la localización de un hospital, escuelas rurales, localización de contenedores de residuos sólidos urbanos, localización óptima de una planta de tratamiento de residuos peligrosos, podemos verlos resueltos en la obra de Bosque y Moreno (Bosque 2004).

En concreto, existen ejemplos de modelos de localización-asignación combinados con SIG, principalmente orientados a instalaciones deseables (las cuales han sido las más estudiadas por motivos sociales), como es el caso de ArcInfo Workstation (y sus versiones sucesivas ArcGis más actuales) que dispone de un módulo de análisis de redes en el cual están implementados modelos como el p-mediano, p-centro y con coberturas, dividiéndolos en aquellos que se aplican al sector privado, público y servicios de emergencias (Esri 1994).

De manera similar, el piloto de redes de gvSIG<sup>17</sup> que aporta la capacidad de gestionar topologías de redes (sobre capas lineales) y la de crear una leyenda de densidades de puntos (sobre capas de polígonos). En cuanto a las topologías de redes, una vez generada asignando los costes de flujo a los arcos, permite el cálculo de rutas sobre esta topología. El piloto de redes calcula el coste total de una ruta o trayectoria y, además, es capaz de calcular la ruta de coste mínimo entre dos puntos. También resuelven los típicos problemas de análisis de redes como matriz de distancias, área de servicio, proveedor más cercano o árbol de recubrimiento mínimo (Conselleria de Infraestructuras y transporte 2010).

Para abordar los diferentes problemas de localización debemos mencionar los aspectos geométricos sujetos a los objetos del mundo real. Esta clasificación responde a que un SIG utiliza diferentes técnicas a la hora de tratar datos puntuales, lineales o poligonales. Desde el punto de vista de un SIG, podemos distinguir tres tipos de problemas de localización basándonos en su geometría: 1) Localización óptima de instalaciones puntuales, 2) trazado óptimo de instalaciones lineales y 3) asignación espacial de los usos del suelo poligonales.

---

<sup>17</sup> gvSIG es un proyecto de desarrollo de Sistemas de Información Geográfica en software libre por *IVER Tecnologías de la Información*, que incluye principalmente las aplicaciones gvSIG Desktop y gvSIG Mobile. gvSIG Desktop fue la primera aplicación que se desarrolló dentro del proyecto gvSIG, y el módulo principal de la plataforma. El piloto de redes es una extensión del módulo principal

### 3.3. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

Cuando nos enfrentamos a un problema real, la elección del objetivo del modelo que lo representa no es una elección trivial. De hecho, la mayoría de aplicaciones de localización deben ser abordadas por un equipo multidisciplinar capaz de conseguir que los diferentes aspectos del problema real queden reflejados adecuadamente en el objetivo. Una de las características que más influye en esta elección es la clase de servicio, instalación o actividad que se intenta localizar. Tradicionalmente se ha asociado el concepto de eficiencia, o sea, los objetivos minisum y maxisum, con la localización de centros de servicio privados, y el concepto de equidad, esto es, los objetivos minimax y maximin, con la localización de centros de servicio públicos.

El problema  $p$ -mediano ha sido formulado como un problema de programación lineal entera con un tiempo polinomial de  $O(n)$ , considerándose un problema NP-completo pudiendo ser resuelto mediante un heurístico del tipo Interchange o “del vecino más próximo”. Sin embargo, estos algoritmos en problemas pequeños (por ejemplo una red de 12 nodos) no dan muy buenos resultados computacionales, contrariamente a lo que ocurre con la relajación lagrangiana. El objetivo del  $p$ -mediano es minimizar el coste (relacionado con la distancia) de localizar un número determinado de instalaciones. Además, este problema puede llevar asociado un peso en los puntos de demanda (demanda ponderada), significando que no todos los puntos de demanda contribuyen igual en la función objetivo.

El problema  $p$ -centro o también conocido como Minimax, trata de localizar  $p$  instalaciones con el objetivo de minimizar la máxima distancia entre la demanda (nodo o arista) y la instalación más cercana a la demanda. Además, en estos problemas distinguimos entre los que las instalaciones pueden ser ubicadas en cualquier lugar de la red (nodos o aristas) conocido como  *$p$ -centro absolutos*, y aquellos problemas donde sólo pueden ser localizadas en los nodos denominados  *$p$ -centro vértices*. Este problema puede ser entendido como un problema de cobertura donde se tienen que localizar  $p$  instalaciones cubriendo toda la demanda y minimizando la distancia de cobertura. Este modelo se utiliza para localizar servicios de emergencia tales como, parques de bomberos, ambulancias o comisarías de policía.

Otros modelos son formulados en función de la demanda cubierta como es el caso de los problemas de localización con cobertura, donde el punto de demanda  $i$  puede ser cubierto por la instalación en el punto  $j$  si la distancia (o tiempo, u otros) entre ambos es menor que  $R$  (valor predeterminado), la cual se conoce como cobertura. Este problema tiene dos variantes muy claramente definidas. La variante más simple, conocida por el problema de *cobertura de conjunto* que intenta minimizar el número de instalaciones y su localización necesarias para cubrir toda la demanda sin una distancia específica. Este modelo tiene dos importantes limitaciones. En primer lugar el modelo tiende a necesitar más instalaciones de las que son permitidas, y en segundo lugar, el modelo falla al diferenciar los nodos de demanda (son considerados todos igual). Para resolver estas limitaciones se formula la otra variante, conocida como el problema de localización de máxima cobertura, cuyo objetivo maximizar la demanda a cubrir a partir de un cierto número de instalaciones de entre un conjunto de lugares candidatos. Estos modelos son resueltos a partir de los algoritmos descritos, principalmente por un greedy adding, una relajación Lagrangiana o uno de tipo Branch and bound.

En el caso de problemas de localización costes fijos el objetivo es minimizar la distancia total y los costes relacionados con la instalación, determinando además el número de instalaciones necesarias para alcanzarlo. En este tipo de problemas se hace necesario la separación entre los costes de fijos y beneficios, con respecto a los de puesta en marcha de la propia instalación, los cuales condicionan el número de instalaciones<sup>18</sup>. Aquí diferenciaremos entre, el *problema de localización de instalaciones con capacidad ilimitada* (UFCCF<sup>19</sup>) y el *problema de localización de capacidad limitada* (CFCCF). En este último se requeriría que la demanda fuera asignada a más de una instalación. Estos problemas pueden ser planteados como una extensión del p-mediano en cuya solución suelen emplearse diversos heurísticos.

Además de estos modelos clásicos, un gran número de problemas se han formulado a partir de éstos, es decir, se consideran extensiones de los vistos anteriormente. Estos problemas como pueden ser el multiobjetivo, el problema de localización con jerarquías, el de asignación de rutas, o del tipo hub, entre otros, permiten a los analistas considerar otros tipos de problemas más realistas, que se convierten al mismo tiempo en más complejos.

---

<sup>18</sup> Implícitamente se está asumiendo el mismo coste construcción en todos los lugares candidatos, y claramente esta suposición no tiene porque ser cierta.

<sup>19</sup> Uncapacitated fixed charge facility location problems/capacitated fixed charge location problem

---

## **CAPÍTULO 4.**

### **EVALUACIÓN MULTICRITERIO EN ENTORNOS SIG**

---

*La evaluación multicriterio es una técnica que da solución a un problema de planificación, previamente definido, basándose en seleccionar una alternativa de entre un conjunto, en presencia de criterios múltiples, y con su propia terminología y problemática. En este capítulo presentamos una visión general de los aspectos fundamentales de la EMC y de su integración con los SIG, así como una revisión detallada de las técnicas que se han desarrollado durante las últimas décadas para abordar y asistir en los procesos de toma de decisiones frente a un problema multicriterio. En el capítulo de presentaran divididas en tres grandes grupos: compensatorias, no compensatorias y borrosas. Finaliza el capítulo examinando los métodos utilizados para llevar a cabo un Análisis de sensibilidad.*

#### **4.1. INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS MULTICRITERIO**

La finalidad de la Evaluación multicriterio es la de “investigar un número de alternativas bajo la luz de múltiples criterios y objetivos en conflicto” (Voogd 1983). Además puede utilizarse para inventariar, clasificar, analizar y organizar convenientemente las alternativas en un proceso de planificación urbana y regional. Orientado en este ámbito el principio básico de una evaluación multicriterio se centraría en componer una matriz de evaluación cuyos elementos fueran, por una parte (columnas), un conjunto de alternativas, y por otra (filas), un conjunto de criterios, para solucionar un problema previamente definido.

Solo a partir de los años sesenta, se comienza a entender la decisión multicriterio como la trataremos a lo largo de este capítulo y se ha definido anteriormente, es decir, el problema de seleccionar una alternativa en presencia de criterios múltiples, y con su propia terminología y problemática (Barba-Romero 1997).

Anteriormente a este periodo, se distinguen dos etapas: el antecedente más antiguo se concreta en el área de la política de la Francia de la segunda mitad del siglo XVIII, y posteriormente a este periodo una segunda etapa, a finales del siglo XIX y XX, donde los economistas de esta época pueden ser considerados los predecesores del análisis multicriterio.

Un empuje importante tuvo lugar en los años 80 con el desarrollo de la informática. Este hecho hizo que muchos de los algoritmos y técnicas multicriterio de periodos anteriores pudieran ser implementados, además de aportar sus propios métodos como fueron la inteligencia artificial y las redes neuronales.

Dentro del análisis multicriterio se pueden distinguir dos grandes ramas (Barba-Romero 1997), la denominada decisión multicriterio discreta, donde la búsqueda de la mejor opción entre un número finito de alternativas posibles es el principal objetivo, y en segundo lugar, basada en la programación lineal con criterios múltiples (tema tratado en el capítulo anterior) apoyándose en los algoritmos relacionados con la misma, como por ejemplo el método simplex.

En esta sección, nuestro interés se centrará en la primera opción, analizando en qué consiste la EMC, cuales son los elementos básicos que conforman una EMC, cuales son los métodos de análisis, ejemplos prácticos mediante técnicas basadas en SIG, etc., con el objetivo de servir de apoyo en la toma de decisiones.

El problema de la decisión multicriterio puede darse en cualquier ámbito, público o privado y, en cualquier situación actúa un decisor el cual tiene la responsabilidad de escoger entre varias posibilidades, denominadas alternativas. Al conjunto de éstas se le denomina conjunto de elección, donde para seleccionar la alternativa mas adecuada dentro de este conjunto, el decisor dispone de una serie de criterios, que pueden ser en determinados casos contradictorios entre sí, dependiendo del ángulo desde el cual se quiera abordar el problema (económico, social, ambiental, etc.).

Uno de los predecesores en el análisis de decisión multicriterio espacial fue Malkcewsky (1999), donde en la década de los noventa comenzó a perfilar el marco en el cual hoy entendemos las técnicas de EMC basadas en GIS. Éste incluye las capacidades de los SIG tales como adquisición de datos, almacenamiento, recuperación, manipulación y análisis, y las capacidades de la EMC, integrándolo todo en un espacio unidimensional con el cual abordar las diferentes alternativas. En su obra describe un gran número de aspectos de la EMC-SIG como: los elementos que conforman estas técnicas, criterios, ponderación, las reglas de decisión, análisis de sensibilidad, los sistemas de toma de decisiones espaciales (SDSS) y casos prácticos. Algunos de los siguientes apartados teóricos se basan en dicho autor.

Como se ha comentado anteriormente, la decisión multicriterio en sus orígenes, no tenía en cuenta la componente espacial, es decir, tradicionalmente no se evaluaban los datos geográficos, únicamente se trataba la componente temática. Pero este paradigma cambió dando paso a un planteamiento distintivo de la decisión multicriterio, donde se crea la posibilidad de analizar con mayor precisión los procesos de decisión. Para ello, ha sido necesaria la integración de los dos elementos fundamentales, SIG y EMC, permitiendo llevar a cabo análisis donde ambas componentes del dato geográfico, la temática y la espacial, proporcionen soluciones a problemas espaciales complejos. En el campo de la decisión territorial, los procedimientos de la EMC basada en técnicas GIS han desarrollado un importante avance en los últimos años.

En los estudios referentes a la ordenación del territorio donde integramos SIG y EMC (Evaluación Multicriterio), la planificación física juega un papel importante. Gómez Orea (1992) la define como “la previsión y control de los usos del suelo mediante una adecuada distribución de las actividades en el territorio”. A partir de aquí, podemos dar el salto a procesos mayores como es la ordenación del territorio, integrando una planificación económico-social con la planificación física.

## ***4.2. ELEMENTOS BÁSICOS EN LA EMC APLICADA A LOS SIG***

### ***4.2.1. Definición del problema y objetivos***

Cualquier proceso en el cual esté implicada la toma de decisiones comienza con el reconocimiento y la definición de un problema, el cual quedará resuelto mediante la diferencia entre el estado actual existente y el estado deseado final. En esta primera toma de contacto se obtienen los datos brutos, que se procesan y examinan para identificar el problema, apoyándonos en un SIG.

Dentro de esta fase de definición del problema, se debe identificar el objetivo, que en nuestro contexto, se entiende como el tipo de regla de decisión a utilizar. Por ejemplo, la localización de un vertedero controlado en un término municipal. Este ejemplo concreto se engloba en un procedimiento de EMC con objetivo simple, pero podrían ser múltiples según el tipo de problema de planificación, decisión, localización/asignación de actividades, que se denominan entonces multiobjetivo.

#### 4.2.2. *Alternativas. Conjunto de elección*

Una alternativa queda definida o caracterizada por los distintos criterios o factores que intervienen en la evaluación. Desde el punto de vista de la planificación territorial, estas alternativas estarían referidas a cada una de las zonas que se pretenden evaluar y sobre las que se realizará la futura selección. Cada alternativa lleva asociada variables de decisión, y el conjunto de estas variables componen el denominado espacio de decisión. En una situación del mundo real estas variables de decisión se corresponden con los agentes limitantes, los cuales determinan las alternativas viables. Hablando en términos GIS, estos limitantes son puntos, líneas o polígonos en una estructura vectorial, o celdas en la estructura ráster, constituyendo así la capa temática cuya finalidad será la de determinar el conjunto global de alternativas de elección.

#### 4.2.3. *Criterios de la evaluación*

La elección de los criterios de evaluación es una de las fases más importantes en un proceso de decisión, una vez definido el problema y su objetivo. Este componente esencial puede definirse como “un aspecto medible de un juicio por el cual una dimensión de las alternativas bajo consideración puede ser caracterizada” (Voogd 1983). Los criterios de evaluación están asociados con las entidades geográficas, cuyas relaciones espaciales se revelan en forma de mapas. Existen dos tipos de criterios: limitantes y factores<sup>20</sup>. Si hablamos en terminología GIS, diríamos que los limitantes se representan mediante un mapa de restricciones (constraint map), y los factores a partir de un mapa de atributos (o mapa temático a partir de capas) (Malczewski 1999). Una vez establecidas estas capas temáticas que corresponden a los criterios que han sido seleccionados para la actividad, pueden ser combinadas a través de las reglas de decisión para alcanzar la evaluación final.

#### 4.2.4. *Reglas de decisión y pesos*

La aplicación de las reglas de decisión es el procedimiento por el cual se obtiene una evaluación concreta. Se trata concretamente de la selección entre alternativas, es decir, son las reglas de decisión las que dictan la clasificación de cada alternativa. La elección de una alternativa respecto a las demás conlleva consecuencias, lo que se denomina resultado de la decisión, y el conjunto de estas consecuencias forman el espacio de los resultados de la decisión (Malczewski 1999). La regla de decisión puede ser compleja cuando se desea integrar un conjunto de criterios distintos, lo que conocemos como evaluación multicriterio.

En un entorno SIG, la adición de las capas resultantes (donde anteriormente, a cada alternativa espacial se le ha asignado un valor de capacidad de acuerdo con la actividad evaluada) de los criterios adoptados, conforman las reglas de decisión.

---

<sup>20</sup> Factor: es un criterio que realiza o detracta la capacidad de asentamiento de una alternativa específica para la actividad en consideración, éste debe ser medido por tanto en una escala continua. Limitante: es un criterio que puede ser expresado también como alguna característica que la solución final pueda poseer (Eastman et al. Gis and decision Making, 1993)



Cuando el decisor ha establecido los criterios respecto a la evaluación, está en disposición de establecer preferencias sobre ellos. Esto significa en la práctica que no todos los criterios tienen la misma importancia y, por lo tanto, se expresan en términos de “pesos”.

4.2.5. *Matrices en una EMC*

Como decíamos anteriormente, la EMC se basa principalmente en una serie de alternativas, que a su vez éstas, han sido determinadas por unos criterios. Así pues, la estructura que se desprende de dicha relación es aquella organizada en forma de matriz. La Figura 11 representa la matriz denominada matriz de Evaluación [aij], donde cada fila expresa las cualidades de cada alternativa i con respecto a los n criterios que se han considerado. Cada columna j representa las evaluaciones de todas las alternativas con respecto al criterio j. Los valores internos de la matriz se denominan puntuaciones de los criterios, los cuales indican la adecuación de cada alternativa en función de cada criterio. Esto convierte a esta fase, asignación de valores a cada alternativa, una de las más importantes, y donde diferentes métodos de EMC despliegan todo su potencial.

		CRITERIOS			
		C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>j</sub>	C <sub>n</sub>
ALTERNATIVAS	A <sub>1</sub>	Valoración de Criterios a <sub>mn</sub>			
	A <sub>2</sub>				
	A <sub>i</sub>				
	A <sub>m</sub>				

Figura 11. Matriz de evaluación. Fuente: (Gómez 2005)

Uno de los elementos que se han de tener en cuenta una vez se ha constituido la matriz de evaluación, es el peso o ponderación de los criterios. Estos nos determinan cuáles son los criterios más relevantes de los establecidos para la actividad evaluada. A cada criterio se le asigna un peso (w<sub>j</sub>) a partir de un valor específico, de acuerdo con el nivel de importancia relativa. Para establecer los pesos a los criterios existen distintas técnicas tal y como se explicarán posteriormente. Así, podemos componer la matriz de prioridades teniendo en cuenta diferentes puntos de vista y otorgar el peso adecuado.

		CRITERIOS			
		C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	...	C <sub>n</sub>
PUNTOS DE VISTA	V <sub>1</sub>	Peso (w <sub>n</sub> )			
	V <sub>2</sub>				
	...				
	V <sub>m</sub>				

Figura 12. Matriz de prioridades. Fuente: (Gómez 2005)

Por último, una vez establecidas la matriz de evaluación y de prioridades, es posible establecer la matriz de valoración. Esta indicará un valor  $r_i$  para cada alternativa, es decir, la capacidad de cada una de ellas para acoger la actividad. Este valor se obtendrá a partir de diferentes procedimientos o métodos que veremos posteriormente.

		ALTERNATIVAS <sub>1</sub>			
		A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	...	A <sub>i</sub>
PUNTOS DE VISTA	V <sub>1</sub>	Valores $r_i$			
	V <sub>2</sub>				
	...				
	V <sub>m</sub>				

Figura 13. Matriz de valoración. Fuente: (Gómez 2005)

#### 4.2.6. Etapas de la aplicación de una EMC en un SIG

Las etapas de una Evaluación multicriterio para resolver un determinado problema de decisión ha de seguir un esquema lógico y debe constar de diferentes fases que pasamos a concretar:

En todo proceso multicriterio existe una primera aproximación o toma de contacto con el marco del estudio. Para ello, debe existir una clara definición del problema y del contexto del mismo, así como de los actores que van a intervenir en dicho proceso (analistas, expertos, inversores, etc.).

Una de las fases que condicionará el proceso completo será la determinación de alternativas y la construcción o modelización de criterios, es decir, construir el modelo de decisión. En esta fase pueden producirse cambios y perfeccionamientos en los criterios hasta adecuarlos al fin buscado. Este también es el momento de establecer los pesos de los criterios, así como de normalizar los mismos. Una vez establecidos estos elementos podemos componer la correspondiente matriz de decisión.

En la siguiente fase se escoge el método de evaluación. Con ello se consigue calcular el nivel de adecuación de las alternativas propuestas al problema de decisión en función de los criterios establecidos.

Después de obtener los resultados tras aplicar el método de evaluación, se procede a la selección de alternativas. Esto queda concretado con la ordenación de las mismas (de la más adecuada a la menos adecuada) y se realiza la selección final.

Tal y como veremos en el apartado 4.6. Análisis de sensibilidad y propagación de errores, todo análisis de decisión ha de terminar con un análisis de sensibilidad mediante el cual se precisa la validez y robustez del modelo. Esto es debido a que los elementos establecidos en el modelo son asignaciones subjetivas, y por lo tanto se debe comprobar como afectan éstas en el resultado final.

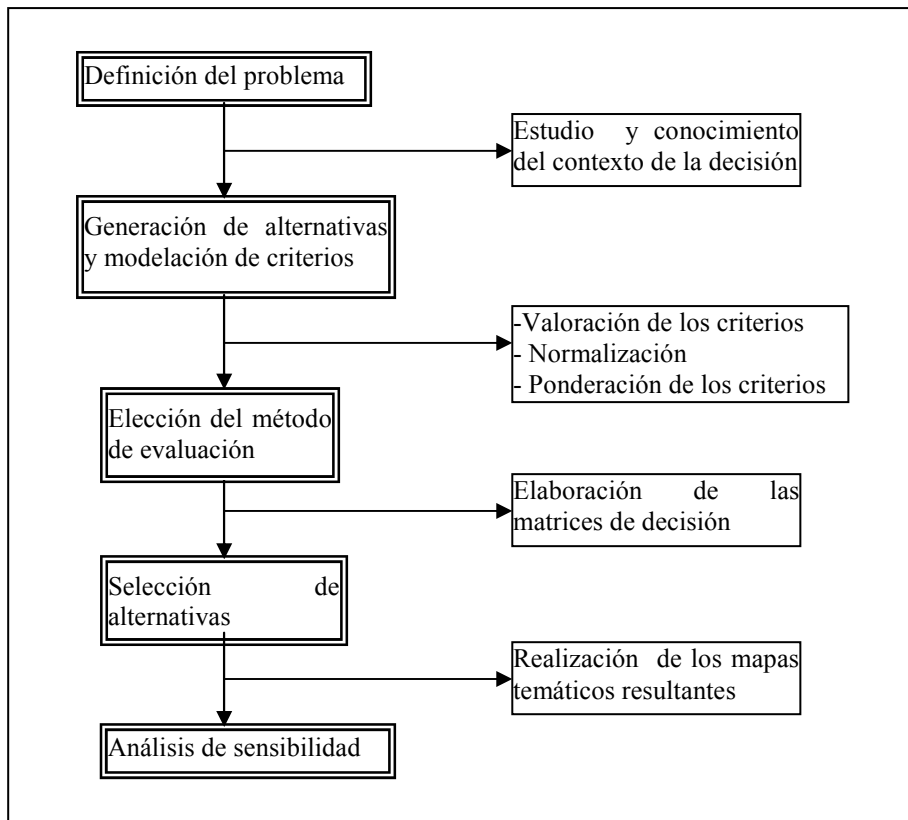


Figura 14. Esquema general de un proceso de decisión multicriterio. Fuentes: (Barba-Romero 1997; Gómez 2005)

La aplicación del procedimiento descrito ofrece el modelo de decisión final, donde las alternativas han recibido un valor e indican de mayor a menor la capacidad de cada lugar del territorio. A partir de ahí, se podrán seleccionar las alternativas que satisfagan las necesidades del territorio para una determinada actividad, es decir, las que muestren los valores más altos.

#### 4.3. SELECCIÓN DE LOS CRITERIOS DE EVALUACIÓN

Para representar de la manera mas adecuada posible la naturaleza multicriterio del problema, la elección del conjunto de criterios debe poseer unas determinadas cualidades. Cada atributo debe ser global y medible, y para ello éstos deben ser:

- Completos: deben cubrir todos los aspectos del problema e indica el grado en que el objetivo global se ha alcanzado.
- Operacionales: deben ser utilizados significativamente en el análisis. Esto implica que a partir de ellos el decisor pueda obtener información relevante para poder decidir y conocer las consecuencias de dicha decisión

- Descomponibles: pueden ser fraccionados en partes menores para simplificar el proceso
- No redundantes: intentar evitar contabilizar las consecuencias del problema de decisión más de una vez. Para ello debería aplicarse un coeficiente de correlación entre cada par de atributos. Si se encontraran altamente correlacionados (valores del coeficiente cercanos a uno) entonces deberían ser eliminados del análisis.
- Mínimos: el número de atributos deberá ser el mas pequeño posible, es decir, obtener un conjunto de atributos que sea imposible de reducir para el problema planteado. Este requisito hace que se reduzca el esfuerzo en la fase de recolección de datos y de cuantificación de las preferencias.

Puesto que cada problema de decisión es diferente y específico del resto, no existen técnicas concretas para la selección de criterios, y dependen del sistema a analizar. Por ejemplo, existen grandes diferencias a la hora de obtener el conjunto de criterios si nos referimos a un análisis de emplazamiento para la instalación de una central nuclear, que si se trata de una escuela infantil o colegio. De esto se desprende que, el conjunto de selección de criterios para un determinado problema de decisión se resuelve a partir de una búsqueda de literatura relevante, estudios analíticos y otras fuentes relacionadas con la actividad evaluada y sus objetivos (Malczewski 1999).

#### **4.3.1. Generación de los mapas de criterios y limitantes. Escala de medida**

Una vez la estructura jerárquica de objetivos y atributos se ha establecido, cada criterio ya puede ser representado en el GIS como una capa temática y será denominado mapa de criterio. Un mapa de criterio representa la distribución espacial de un atributo el cual mide el grado en que su objetivo asociado es alcanzado. Además, como hemos visto anteriormente, es necesario distinguir en los dos tipos existentes de criterios: los factores (criterios de evaluación) y los limitantes. De este modo ambos conceptos son opuestos, ya que el mapa de factores hace referencia la distribución espacial de un atributo, y el mapa de limitantes es una restricción impuesta en el problema de decisión, y pondrá de manifiesto en el mapa cuales son las alternativas viables. Para la generación de estos mapas en un GIS es necesario el conocimiento de creación de bases de datos espaciales y funcionalidades, tales como la entrada de datos, almacenamiento de los atributos, manipulación y análisis espaciales de la información y obtención de resultados.

Para que estos criterios puedan ser comparables, el análisis de decisión multicriterio requiere que éstos sean transformados a unidades semejantes, donde para ello existen diferentes métodos que veremos en los apartados sucesivos (métodos EMC y posterior normalización de criterios). Los mapas de criterios (datos temáticos en el SIG) se dividen en cuantitativos y cualitativos (Voogd 1983). En el caso de una escala cuantitativa las unidades de medidas son conocidas, por ejemplo, kilómetros o hectáreas, contrariamente a lo que ocurre en una escala cualitativa. A su vez, ambas escalas están subdivididas en dos. Las escalas cuantitativas se dividen en escalas de intervalo y de razón. La diferencia fundamental entre ambas es que la escala de razón tiene como origen cero y los valores se encuentran ordenados. Las escalas cualitativas se dividen en escalas ordinales y nominales. Las escalas ordinales aportan mayor información que las nominales puesto los valores en esa escala dada están clasificados (ordenados, por ejemplo mayor-menor) pero no cuantificados. Sin embargo, las escalas nominales

únicamente muestran una etiqueta o un nombre, es decir, son simples identificadores (nombre de una calle por ejemplo) y no existe la posibilidad de realizar operaciones matemáticas con dichos valores.

Este es el principal problema que concierne a los datos espaciales en un SIG, puesto que un número elevado de datos suelen estar representados por escalas nominales. Diversos procedimientos y métodos, como por ejemplo el método de las jerarquías analíticas de Saaty con el que se obtienen escalas de razón, los datos pueden ser utilizados en un análisis multicriterio.

Sin embargo, respecto al tipo de escalas de medida, debemos citar la clasificación en el contexto de decisión que propone Jacek Malczewski (1999) donde en un primer nivel divide en escalas naturales (también denominadas objetivas o externas) y escalas construidas (también denominadas subjetivas o índices subjetivos). La principal diferencia entre ambas es que en la primera no se aplican juicios de valor, son atributos naturales, inherentes al objetivo que se desea alcanzar. Ambas escalas, naturales y construidas, se dividen en escalas directas y alternativas (Proxy). Las escalas directas miden el grado de satisfacción del objetivo directamente asociado, es decir, un mapa de criterios de escala directa representaría el valor concreto de cada atributo. Por el contrario, las escalas Proxy, no lo cuantifican sino únicamente reflejan el grado de satisfacción. En última instancia, la clasificación de los mapas de criterios esta relacionada con la distinción entre enfoque determinista y bajo incertidumbre (probabilístico y borroso). La transformación de escala lineal es el método más empleado para transformar la gran variedad de escalas en que los datos pueden ser medidos en unidades homogéneas para su posterior tratamiento.

#### **4.4. MÉTODOS DE PONDERACIÓN DE CRITERIOS Y REGLAS DE DECISIÓN**

Como se ha comentado anteriormente, no todos los criterios tienen la misma importancia respecto a otros, pudiendo ser debido por ejemplo a circunstancias personales y por lo tanto subjetivas u objetivas. De modo que, para jerarquizar dichos criterios se utilizan los pesos o ponderaciones, y pueden ser definidos como el valor asignado a un criterio de evaluación que indica su importancia relativa respecto a otros criterios bajo consideración. Cuanto más elevado es el valor asignado al peso, más importante es el criterio en el sistema global (Barba-Romero 1997; Malczewski 1999).

Una notación aceptada y difundida para el concepto de peso es  $w_j$  que es el peso asignado al criterio  $j$  independientemente del carácter del mismo. También haremos mención al vector de pesos  $w = [w_1, \dots, w_n]$  que define el conjunto de todos ellos. En este tipo de análisis los pesos, usualmente, son normalizados y por lo tanto cumplen que

$$\sum w_j = 1.$$

La principal diferencia entre los métodos que se describen a continuación es la precisión de cada uno de ellos, la facilidad de uso, el entendimiento por parte del decisor, el fundamento teórico y la disponibilidad o facilidad de incorporación en los SIG. De los métodos que se exponen a continuación el método de las Jerarquías Analíticas es el más

aceptado por su rigurosidad, mientras que el resto pueden servir como una aproximación para la ponderación de criterios.

#### 4.4.1. Clasificación de los métodos de ponderación de criterios

##### 4.4.1.1. Métodos de valoración. Ordenación simple (Ranking methods)

Son los métodos más sencillos para valorar la importancia de un criterio respecto a los demás, es decir, para establecer los pesos. Cada criterio del análisis es clasificado según las preferencias del decisor, y posteriormente se aplica uno de los siguientes procedimientos usualmente utilizados: la suma de rangos, rangos recíprocos y exponente de rangos. En general, cuanto mayor es el número de criterios establecidos, menos indicados se hacen estos métodos (aproximadamente 7 criterios) (Voogd 1983). Los pesos a partir de la suma de rangos se calcula según la siguiente expresión:

$$w_j = \frac{n - r_j + 1}{\sum (n - r_k + 1)} \quad \text{Ec. 14}$$

donde  $w_j$  es el peso normalizado para cada uno de los criterios,  $n$  es el número de criterios establecido ( $k= 1,2,\dots,n$ ), y  $r_j$  es la posición en la clasificación del criterio.

Para calcular los pesos a partir del método de los rangos recíprocos, se aplica la siguiente expresión, a partir de un rango de criterios recíprocos normalizados:

$$w_j = \frac{1/r_j}{\sum (1/r_k)} \quad \text{Ec. 15}$$

Por último, el método del exponente de rangos requiere un elemento adicional,  $p$ , el cual es especificado por el decisor y oscila entre 0 -1. Cuando  $p$  vale 0, se asignan igual peso a los criterios de evaluación, y cuando  $p$  vale 1 resulta la suma de rangos.

$$w_j = \frac{(n - r_j + 1)^p}{\sum (n - r_k + 1)^p} \quad \text{Ec. 16}$$

##### 4.4.1.2. Métodos de la tasación simple (Rating methods)

Este método requiere de la contribución del decisor para estimar los pesos a partir de una escala determinada (por ejemplo de 0 - 100). Estos métodos son criticados por su difícil justificación en la asignación de los pesos, debido a la ausencia de una base fundamental consolidada. Uno de los más sencillos es el método denominado asignación del punto,

donde se asignan 100 puntos a lo largo de los criterios de interés, donde 0 indica que el criterio puede ser ignorado, y 100 sería el caso ideal donde considerando un único criterio se resuelve la situación de decisión. Por lo tanto, cuantos más puntos reciba un criterio, más importante es dicho criterio. Una alternativa a este método es el procedimiento del radio de estimación donde al criterio más importante se le asigna 100, y dicha puntuación va descendiendo hasta el criterio menos importante. De modo que, el ratio será  $w_j/w^*$ , donde  $w^*$  es la puntuación más baja y  $w_j$  es la puntuación del criterio  $j$ . Por último, los pesos son normalizados, dividiendo cada peso por la suma de todos.

**4.4.1.3. Método de la comparación por pares (pairwise comparison methods)**

El método de comparación por pares fue desarrollado por Thomas Saaty en 1980 en el contexto del Procedimiento de las Jerarquías Analíticas (AHP) (apartado 4.4.2.1. Técnicas compensatorias aditivas). Se fundamenta en establecer una matriz cuadrada donde sus filas y sus columnas están definidas por el número de factores a ponderar. De este modo, se comparan pares de factores, estableciendo la importancia que tiene cada uno frente a los demás. Posteriormente se determina el eigenvector, donde quedan establecidos los pesos, y también el eigenvalor que proporciona una medida cuantitativa de la consistencia de los juicios de valor entre pares de factores (Saaty 1980). Podríamos estructurar el método en tres etapas:

**Desarrollo de la matriz de comparación por pares.** Para constituir esta matriz es necesario utilizar una escala de valores del 1 al 9 (y los inversos), comparando dos factores mediante un juicio de valor, completando todas las celdas, donde la matriz es recíproca, es decir, ambos lados de la diagonal tienen valores inversos.

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
Extrema	Fuerte	Moderada	Igual	Moderada	Fuerte	Extrema		
Criterios menos importantes					Criterios más importantes			

**Tabla 12. Escala de valores para comparación por pares**

**Cálculo de los pesos de los criterios.** Calcularemos los pesos a partir de una serie de juicios de valores entre pares de factores. Esta fase agrupa las siguientes operaciones: 1) suma de los valores de cada columna de la matriz, 2) Normalización de los pesos de la matriz, y 3) calcular la media de los elementos de la matriz normalizada para cada fila para estimar los pesos relativos que están siendo comparados. El valor más alto representa el criterio más importante.

**4.4.1.4. Estimación de la razón de consistencia**

El ratio de consistencia determina la coherencia aritmética de las matrices de comparación por pares establecidas. Este valor se establece a partir del índice de consistencia (CI) y un índice aleatorio (RI). Para afirmar que los juicios de valor

asignados son satisfactorios y suficientemente consistentes para establecer los pesos ( $w_{ij}$ ) el valor del ratio de consistencia ha de ser inferior a 0,10.

En el apartado 5.3.2 se realiza una explicación detallada del cálculo del ratio de consistencia en el caso de estudio apoyado en la teoría de M. Gómez y J. Malczewski (Gómez 2005; Malczewski 1999).

#### 4.4.1.5. *Métodos de análisis de compensación (trade-off Analysis methods)*

La teoría anterior se ha centrado en los principales elementos de un sistema de decisión multicriterio, como son los criterios de evaluación, alternativas, limitantes y ponderación. El siguiente objetivo para concluir el análisis será el de combinar los elementos anteriores para adoptar las reglas de decisión adecuadas con la finalidad de resolver el problema. Estas reglas de decisión proporcionaran las herramientas y métodos para organizar, clasificar y ordenar las alternativas y decidir que alternativa es la más adecuada. Concretamente, estas reglas de decisión ordenan el espacio de decisión por medio de relaciones uno a uno (consecuencias seguras) o de uno a muchos (consecuencias inseguras). Posteriormente, se detallaran las reglas de decisión más comúnmente utilizadas.

Actualmente, existen métodos muy diversos, cuyas disimilitudes se centran básicamente en la complejidad operacional (procedimiento aritmético-estadístico) sobre las matrices de evaluación, los datos de partida, su ámbito de aplicación, etc., y, por lo tanto, vamos a seleccionar aquellos que están más extendidos y se utilizan usualmente en trabajos de planificación y en un entorno SIG.

Pero esta situación no siempre ha sido así (Voogd 1983), dado que hasta los años 80 no se puso demasiada atención a los métodos de ponderación para una EMC en lo que respecta al ámbito de la planificación, contrariamente a lo que ocurría en otras disciplinas altamente utilizados y desarrollados. El autor realiza una clasificación de las técnicas recomendadas en una EMC en función de la información de partida:

- Técnicas cardinales: son las que utilizan datos cuantitativos, tales como la Suma Ponderada, análisis de concordancia, el índice doble y rescoring.
- Técnicas de frecuencia, donde los datos cualitativos son transformados en una escala binaria o nominal, principalmente el análisis de concordancia cualitativo interpretación numérica y permutación cualitativa.
- Técnicas mixtas: donde es posible tanto la utilización de datos cualitativos como cuantitativos. De ellas destacamos la técnica de la suma substractiva, intervalo substractivo, intervalo aditivo y el modelo de datos mixtos.

A continuación, se van a describir las técnicas de EMC clasificadas en tres grandes grupos: las compensatorias, no compensatorias y borrosas. Esta clasificación tiene sus orígenes a mediados de los 90 por Jankowski, y se ha considerado adecuada para clarificar el panorama de dichas técnicas. En los últimos años ha aumentado la tendencia



respecto al uso de aquellas técnicas relacionadas con la lógica borrosa<sup>21</sup>. La Figura 15 representa dicha clasificación.

#### 4.4.2. *Clasificación de las técnicas de EMC. Reglas de decisión*

Barba-Romero y Pomerol (Barba-Romero 1997; Malczewski 1999) hacen una revisión de un gran número de métodos de decisión clasificándolos y agrupándolos en: 1) métodos de asignación directa, 2) métodos de eigenpesos (destacando el método de las jerarquías analíticas), 3) métodos de comparación de alternativas o de aproximación, y 4) método de la entropía (este último es un método objetivo donde los propios datos son los que determinan la importancia relativa de los criterios, en lugar del decisor., mientras que el resto tienen un carácter subjetivo).

Malczewski (1999) afirma que las técnicas aditivas<sup>22</sup> son las más ampliamente utilizadas en los métodos de EMC para la toma de decisiones basadas en SIG. Dicho autor se centra en el método de la suma ponderada, función de aproximación valor/utilidad, método de las jerarquías analíticas, además del método del punto ideal y el método de concordancia.

Como se observa en el esquema de la figura 13, las técnicas de EMC siguiendo la clasificación de Gómez y Barredo (Gómez 2005), basada en la desarrollada por P. Jankowski, se divide entre tres grandes grupos: compensatorias<sup>23</sup>, no compensatorias y lógica borrosas. A su vez las técnicas compensatorias se subdividen en:

- Técnicas aditivas: sumatoria lineal ponderada, método de las jerarquías analíticas, método de concordancia-discordancia y el sistema de propiedades MultiAtributo (MATS)
- Técnicas basadas en la aproximación del punto ideal: TOPSIS, AIM y MDS

Las técnicas compensatorias requieren que el analista o decisor establezca los pesos de los criterios como valores cardinales o funciones de prioridad, mientras que las no compensatorias requieren una jerarquización ordinal de los criterios establecidas por el decisor, sin establecer un peso  $w_j$  de manera cuantitativa, y de manera que un criterio no puede ser compensado puesto que no realizan operaciones entre los mismos. Por último, las técnicas basadas en la lógica borrosa emplean una escala no numérica basada en categorías nombradas como alto, medio, bajo, por ejemplo, para evaluar las alternativas con respecto a una serie de atributos. Es importante destacar que este último grupo proporciona una significativa y potente representación en la medida de incertidumbre acerca de los datos geográficos y de las reglas de decisión, además de la representación de conceptos imprecisos.

---

<sup>21</sup> Los métodos basados en lógica borrosa emplean escalas no numéricas para categorizar los criterios, tales como: Muy Alta, Alta, Media, Baja, Muy Baja.

<sup>22</sup> Aquellos donde el valor obtenido para cada alternativa es el producto del peso del criterio y las puntuaciones de los criterios, seleccionando la alternativa de mayor valor como la más adecuada

<sup>23</sup> Las técnicas compensatorias proporcionan un mecanismo que tiene en cuenta el carácter compensatorio de un criterio sobre otro, necesitando un juicio de valor para tratar los criterios conflictivos. Sin embargo, las no compensatorias utilizan un umbral establecido por el analista, sumiendo una estrategia reductora del conjunto de alternativas globales.

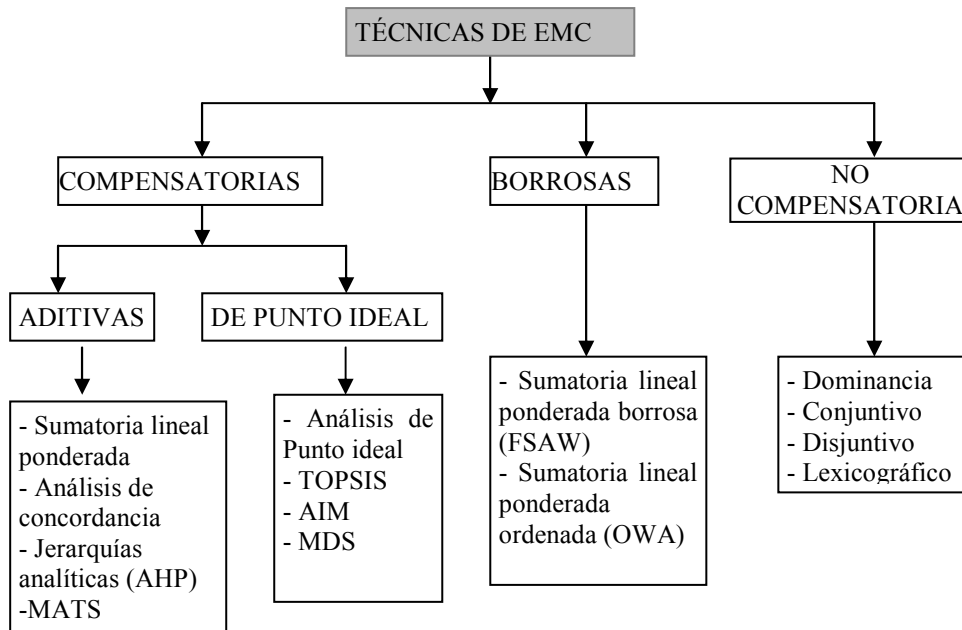


Figura 15. Clasificación de las técnicas de EMC. Fuente: (Gómez 2005)

4.4.2.1. *Técnicas compensatorias: aditivas y de punto ideal*

**Sumatoria Lineal Ponderada (Simple additive weighting method: SAW)**

Se trata de uno de los métodos más extendidos y utilizados por su sencillez y manejabilidad operativa. Una vez que las alternativas y los pesos están normalizados según alguno de los procedimientos explicados anteriormente, es posible calcular la evaluación global de cada alternativa, sumando el resultado de multiplicar el valor de cada criterio por su peso:

$$r_i = \sum_{j=1}^n w_j v_j \tag{Ec. 17}$$

donde

$r_i$  es el nivel de adecuación de la alternativa  $i$

$w_j$  es el peso del criterio  $j$ , donde  $\sum_{j=1}^n w_j = 1$

$v_j$  es el valor ponderado de la alternativa  $i$  en el criterio  $j$

Las alternativas se clasificarán en función de los valores  $r_i$  obtenidos, y se escogerá aquella con la mejor evaluación global. Este método puede ser implementado en cualquier GIS tanto ráster como vectorial, y realizando el solapamiento de las capas (criterios) permite la evaluación de los mapas de criterios y la elección de la alternativa más adecuada (mayor valor).

### **Métodos de concordancia**

Este método se basa principalmente en la comparación por pares de alternativas (Malczewski 1999) donde se establece una clasificación ordinal entre ellas. La comparación de un par de alternativas, expresa que una alternativa A es más adecuada que B para el objetivo planteado, este método no informa de cuánto más adecuada. La implementación de este método más conocida es el ELECTRE I (*Elimination et Choice Translating Reality*) y sus posteriores modificaciones hasta el PROMETHEE.

La comparación por pares del método ELECTRE esta basada ampliamente en que la puntuación de los criterios y los pesos asociados confirman o contradicen la relación de dominancia entre pares de alternativas. Esto quiere decir, que por un lado la medida de concordancia representa la dominancia de una alternativa  $i$  respecto otra  $i'$ , para todos los criterios en que  $i$  es igual o mejor que  $i'$ . Y por otro lado, se mide la discordancia, donde  $i'$  es mejor que  $i$ . Una vez estos indicadores han sido calculados para todos los pares de alternativas, se cuantifican las concordancias y discordancias entre ellas y se seleccionan la que tenga el valor de concordancia mayor. Una de las ecuaciones para calcular estos la puntuación global de cada alternativa sería:

$$C_i = \sum_i c_{ii'} \quad \text{Ec. 18}$$

donde  $c_{ii'} = (\sum_j w_{jii'} / \sum_j w_j)$ ,  $\sum_j w_{jii'}$  es la suma de los pesos de esos criterios cuando al alternativa  $i$  no es la peor respecto a su competidora  $i'$ , y  $\sum_j w_j$  es la suma de todos los pesos.

### **Método de las jerarquías analíticas (AHP)**

Este método estaría englobado en los denominados como eigenpesos, basados en el cálculo del autovector dominante (eigenvector) de una matriz de comparaciones binarias de los criterios. Este método fue propuesto por el matemático americano Thomass Saaty a finales de los años 70 y ha sido aplicado en un gran número de estudios de muy diversas disciplinas tales como, planificación urbana, política, salud, etc. Se fundamenta principalmente en tres principios: descomposición, juicios comparativos y síntesis de las prioridades del problema de decisión (Malczewski 1999).

El principio de descomposición requiere que el problema de decisión sea descompuesto en una jerarquía donde se capten los elementos esenciales de dicho problema. El principio de juicios comparativos requiere valorar la comparación por pares de los elementos en un nivel dado de la estructura jerárquica, con respecto a los de los niveles superiores. Y, por ultimo, el principio de síntesis toma cada una de las escalas de prioridades resultantes en cada nivel de jerarquía y construye un conjunto de prioridades global, que será el utilizado para evaluar las distintas alternativas.

Para llevar a cabo estos principios, se han estructurado el proceso en las siguientes fases:

- Definición del problema de decisión y sus criterios.
- Desarrollo de la estructura AHP jerárquica. Este paso consiste en descomponer el problema de decisión en una estructura jerárquica, donde el nivel más alto pertenece al objetivo predominante. Descendiendo a través de dicha jerarquía alcanzamos el nivel más específico de los atributos, es decir, generalmente esta estructura se organiza en cuatro niveles: meta, objetivos, atributos y alternativas. Las alternativas son representadas en la base de datos del GIS por medio de capas, las cuales contienen los valores de los atributos de cada alternativa. Este concepto de atributo es el nexo de unión entre el AHP y el GIS.
- Comparación de los elementos de decisión mediante la comparación por pares. Con ello se reduce la complejidad de problema puesto que únicamente dos elementos son considerados a la vez. Para ello, en primer lugar se ha de desarrollar la matriz de comparación de cada nivel de la jerarquía. Posteriormente, dotar de pesos a cada elemento de cada nivel. Y por último, la estimación de la consistencia. Hay que tener en cuenta que a comparación por pares se utiliza para un número pequeño de elementos en cada nivel de la jerarquía, de modo que el número de alternativas ha de ser pequeño también. Si el número de alternativas es elevado, el proceso se lleva a cabo mediante el denominado spatial AHP en el entorno GIS, donde el procedimiento acabaría en el nivel de atributos (factores).
- Cálculo de la puntuación global. El último paso consiste en determinar los pesos de los niveles establecidos, y a partir de estos el vector de pesos compuestos o globales (multiplicando la matriz de pesos relativos en cada nivel jerárquico, desde el más general al más particular). Este vector de pesos globales tendrá dimensiones 1 por m, donde m es el número de las alternativas de decisión del último nivel de la estructura. La puntuación global  $R_i$  se obtiene mediante la expresión:

$$R_i = \sum_k w_k r_{ik} \quad \text{Ec. 19}$$

donde  $w_k$  es el vector de prioridades (pesos) asociado a cada elemento k de la estructura jerárquica de criterios, la suma de  $w_k$  es igual a 1, y  $r_{ik}$  es el vector de prioridades obtenido al comparar las alternativas con cada criterio.

Por último, la clasificación de las alternativas a partir del valor obtenido de  $R_i$  permite seleccionar la más adecuada, siendo esta la que posea el máximo valor.

#### 4.4.2.2. *Técnicas compensatorias basadas en el punto ideal*

Las técnicas basadas en el punto ideal se fundamentan en seleccionar una alternativa considerada la ideal o mejor posible, a partir del valor más alto en cada uno de sus criterios. Por lo tanto, una vez establecidas las coordenadas de dicha alternativa, es posible calcular la distancia entre cada alternativa del conjunto de selección y dicho punto ideal, determinándose de este modo las más aptas para cierta actividad o

instalación como aquéllas que se encuentren a menor distancia. Como veremos a continuación brevemente, los procedimientos más empleados son: TOPSIS<sup>24</sup>, AIM<sup>25</sup>, MDS<sup>26</sup> y el punto ideal (Gómez 2005; Malczewski 1999).

### **Análisis de Punto Ideal**

Como hemos resumido previamente, el método del Análisis del punto ideal se basa en el cálculo de los desvíos (distancia) de cada alternativa con un punto ideal que se considera inalcanzable, en un espacio multivariado donde cada criterio representa un eje. Este punto ideal no existe dentro del conjunto de soluciones, no obstante, sirve como referencia del resto de alternativas, es decir, reúne los máximos atributos de los criterios establecidos.

En relación a los pesos de los criterios en este método, éstos pueden introducirse en la ecuación de cálculo de la distancia como un factor modificador de los desvíos, según el peso asignado a cada uno. La ecuación que define la regla de decisión del punto ideal es:

$$D_p = \left[ \sum_{j=1}^n w_j |v_{ij} - v_j^*|^p \right]^{1/p} \quad \text{Ec. 20}$$

donde,

$D_p$  es la distancia entre cada alternativa y el punto ideal

$w_j$  es el peso asignado al criterio j. El  $\sum_{j=1}^n w_j$  debe ser igual a 1

$v_{ij}$  es el valor de la alternativa i en el criterio j normalizado

$v_j^*$  es el valor del punto ideal para el criterio j, cuya valor es 1 o máximo en todos los criterios lo que conllevaría a normalizarlos también.

$p$  es la métrica de la distancia, siendo  $p=1$  para la distancia de Manhattan y  $p=2$  para la distancia euclídea.

### **Técnica TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to ideal solution)**

Este método creado por Hwang y Yoon en 1981 tiene su fundamento en el punto ideal, visto anteriormente, aunque incluye un nuevo elemento, que es el punto anti-ideal<sup>27</sup>. Este punto anti-ideal se puede entender como la mejor alternativa siendo ésta la que se encuentre lo más alejada posible del punto ideal. Este método requiere de un analista para especificar sus preferencias en sus atributos en forma cardinal, asumiendo

---

<sup>24</sup> Technique for Order Preference by Similarity to ideal solution

<sup>25</sup> Aspiration-level Interactive Method

<sup>26</sup> Multi-Dimensional Scaling

<sup>27</sup> Otros autores los denominan punto ideal positivo y punto ideal negativo (Malczewski 1990)

información cuantitativa. Resumiendo el procedimiento consistiría en: 1) Determinar el conjunto de alternativas, 2) Normalización de los criterios (sus atributos en cada capa), 3) definir los pesos  $w_j$  para cada criterio, 4) Determinación del punto ideal a partir de los valores máximos asignados a los criterios, 5) Determinación del punto anti-ideal a partir de los valores mínimos asignados a los criterios, 6) Calcular las distancias al punto ideal 7) Calcular la distancia al punto anti-ideal, y 8) Obtención de la relación de similitud. Veamos las ecuaciones que se aplican (Gómez 2005; Malczewski 1999):

$$d_p^M(a_i^+) = \left[ \sum_{j=1}^n w_j |v_j^M - v_{ij}|^p \right]^{1/p}$$

$$d_p^m(a_i^-) = \left[ \sum_{j=1}^n w_j |v_j^m - v_{ij}|^p \right]^{1/p}$$

$$D_p(a_i) = \frac{d_p^m(a_i)}{d_p^M(a_i) + d_p^m(a_i)} \quad \text{Ec. 21}$$

donde,

$d_p^M(a_i^+)$  es la distancia al punto ideal de la alternativa i

$d_p^m(a_i^-)$  es la distancia al punto anti-ideal de la alternativa i

$w_j$  es el peso del criterio j

$v_j^M$  es el valor máximo normalizado en el criterio j

$v_j^m$  es el valor mínimo normalizado en el criterio j

$v_{ij}$  es el valor normalizado de la alternativa i en el criterio j

$p$  es la métrica de la distancia, siendo  $p=1$  para la distancia de Manhattan y  $p=2$  para la distancia euclídea.

La ecuación que refleja la relación de similitud varía entre 0 y 1, siendo los valores más adecuados de las distintas alternativas aquéllos que más se acerquen a 1. Esta técnica puede ser implementado en entornos GIS tanto ráster como vectorial, aunque es más adecuada para estructuras ráster.

#### 4.4.2.3. Técnicas borrosas

La lógica borrosa fue descrita por primera vez por el matemático L.A. Zadeh en 1965 y el mismo autor la definió como una metodología para hacer cálculos con palabras. Esta teoría pretende trasladar expresiones naturales del conocimiento y sentido común en un formalismo matemático preciso. La lógica borrosa surge como contraposición a la lógica

binario de 1 y 0, verdadero o falso. Esta teoría está diseñada para tratar casi cualquier problema en el mundo real por ser considerado sin un límite bien definido, es decir, por un rango de establecido a partir de un rango de valores entre 0 y 1.

La técnica borrosa requiere únicamente escalas no numéricas para la evaluación de las alternativas con respecto a un número de atributos. El procedimiento en términos generales consiste en dividir el conjunto de alternativas en dos grupos: aceptables e inaceptables, asignándole a cada criterio un grado diferente de importancia, que a su vez ya proporciona un orden natural. Un ejemplo de esta escala para una alternativa de un criterio sería: Muy Alto, Alto, Medio, Bajo y Muy Bajo. Veamos dos métodos destacables de la lógica borrosa

#### **Sumatoria Lineal Ponderada Borrosa ( Fuzzy Simple Additive Weighting : FSAW)**

Esta técnica es similar a la Sumatoria Lineal convencional siendo la principal diferencia que la FSAW opera con datos borrosos, es decir, que los datos de la matriz de decisión y los pesos son establecidos en términos borrosos. El método puede ser implementado en un GIS realizando los pasos siguientes: 1) Establecerse los términos lingüísticos para cada factor implicado y asignar el número “borroso” que pertenezca a cada punto crítico<sup>28</sup> de cada variable, 2) Multiplicar cada componente individual por el peso otorgado<sup>29</sup> a cada variable, 3) Se realiza la agregación (superposición) de todos los factores, 4) Obtención de las alternativas “borrosas” que hay que ordenar según el nivel de adecuación alcanzado.

#### **Sumatoria Lineal Ponderada Ordenada ( ordered Weighted Average, OWA)**

Esta técnica es la unión como veremos de un método de EMC estricto y la lógica borrosa. Ésta se conforma a partir de la generalización de tres tipos básicos de funciones de agregación: 1) la intersección de conjuntos borrosos, 2) la unión de conjuntos borrosos, y 3) los operadores de medias. OWA es una suma ponderada con criterios de evaluación ordenados

El método consiste en emplear conjuntamente los pesos de los factores y otra clase de pesos “ordenados” que controlan la agregación de esos factores ponderados. Este procedimiento permite controlar el nivel total de compensación permitido. Estos pesos también han de sumar la unidad y a partir de ellos y de las distintas combinaciones de los mismos, se determina el espacio triangular de decisión. Para situarse en cualquier lugar de este triángulo de decisión se introducen medidas de *ANDness*, *ORness* y *Compensación* (tradeoff) asociadas a cualquier conjunto de pesos ordenados, y se calcularan a partir de (Malczewski 1999):

---

<sup>28</sup> El punto crítico es cada componente individual en que se divide una variable (alta, media, baja, etc.) asignándole un número “borroso” (ver en Malcewski (Malcewski 1990) un ejemplo de aplicación.

<sup>29</sup> Estos pesos también son tratado como números “borrosos” y por tanto están representados por más de una componente.

$$ANDness(w) = \frac{1}{n-1} \sum_r (n-r)w_r \quad \text{Ec. 22}$$

$$ORness(w) = 1 - ANDness \quad \text{Ec. 23}$$

$$Tradeoff(w) = 1 - \left[ \frac{n \sum_r (w_r - 1/n)^2}{n-1} \right] \quad \text{Ec. 24}$$

donde,

$n$  es el número de factores

$r$  es el orden de los factores

$w_r$  el peso para los factores en el orden  $r$

La aplicación del método OWA tiene gran implicación en las decisiones que conllevan un riesgo, siendo el máximo riesgo (postura pesimista) la obtenida mediante el operador AND, y mientras que el mínimo riesgo (postura optimista) se obtiene mediante el operador lógico OR. Las soluciones intermedias entre los criterios se obtienen mediante la aplicación del tradeoff.

#### 4.4.2.4. *Técnicas no compensatorias*

Las técnicas no compensatorias se fundamentan en aplicar una técnica de reducción del conjunto de alternativas globales en base a la evaluación de al menos un criterio, sin efectuar ningún tipo de operación previa sobre los valores asignados a las alternativas. Esta estrategia de reducción se aplica en base a la relevancia de un criterio frente a los demás, es decir, es necesario que el analista especifique un valor máximo o mínimo (un umbral) para cada evaluación del criterio. Este umbral limita las alternativas puesto que no se consideran las inaceptables a partir de dicho umbral. Podemos distinguir entre los siguientes métodos (Gómez 2005; Malczewski 1999).

#### **Método Conjuntivo**

Fijado un umbral para cada criterio, se eliminan las alternativas que excedan o no lleguen a dicho umbral todos los criterios una vez evaluados. El procedimiento sería: 1) Selección del umbral para cada atributo, 2) Se genera una nueva capa donde los atributos tienen valores 1 (cumple el umbral) ó 0 (otro caso), y 3) Solapamiento de todas las capas para obtener una nueva conteniendo ceros y unos (correspondería el operador lógico AND). Está última capa resultante indica las alternativas que cumplen con el umbral, teniendo el valor de 1 todos sus atributos.



**Método Disjuntivo**

Este método es similar al anterior excepto que en la estrategia disyuntiva las alternativas solo necesitan satisfacer alguna de los criterios para ser aceptada en la decisión. Se eliminan las alternativas que sobrepasen el umbral establecido en alguno de sus criterios. El procedimiento selecciona la alternativa que al menos cumpla el umbral en un atributo. El procedimiento es igual que en el caso anterior, únicamente que en el punto 3) se utiliza para la capa resultante el operador lógico OR.

Además de estos dos métodos podemos mencionar el denominado Lexicográfico y de eliminación que pasamos a explicar.

**Método Lexicográfico**

Este método requiere que el decisor ordene los criterios de más a menos importancia. Una vez ordenados, se comparan las alternativas una a una teniendo en consideración el orden de los criterios previamente establecidos, y se eliminan aquellas que muestran un valor menor en la comparación. Así, conforme avanza el procedimiento el número de alternativas del conjunto bajo consideración se ve reducido, hasta quedarnos con la “mejor” de ellas para el primer criterio. A continuación se realiza la misma operación para el segundo criterio, tercero, etc. hasta finalizar con todos los criterios.

**Método de eliminación por atributos**

Este método combina el lexicográfico y el conjuntivo. Esto quiere decir que las alternativas se comparan según sus atributos, pero además han de cumplir un estándar especificado. Si no es así son eliminadas (Barba-Romero 1997).

**4.5. NORMALIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS**

Ciertos métodos multicriterio realizan una “estrategia de compensación” entre los valores obtenidos para una misma alternativa respecto a criterios diferentes. Esto es debido a que existe una diferencia de valores en diferentes escalas nominales no están referidos al mismo sistema de medida y, por lo tanto, puede provocar resultados completamente distintos a los esperados y no son comparables en muchos casos. Por este motivo, es necesario transformar todas las evaluaciones a valores entre 0 y 1, proceso al que se le denomina Normalización de Evaluaciones (Barba-Romero, 1993). Este procedimiento transforma el vector de las n alternativas ( $a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{nj}$ ) en un vector normalizado ( $v_{1j}, v_{2j}, \dots, v_{nj}$ ) para un criterio j dado. En la Tabla 13 se muestran los principales procedimientos de normalización, donde:

PROCEDIMIENTO1	PROCEDIMIENTO 2	PROCEDIMIENTO3	PROCEDIMIENTO4
$v_i = \frac{a_i}{Max a_i}$	$v_i = \frac{a_i - Min a_i}{Max a_i - Min a_i}$	$v_i = \frac{a_i}{\sum a_i}$	$v_i = \frac{a_i}{(\sum a_i^2)^{1/2}}$

**Tabla 13. Principales métodos de normalización. Fuente: Barba-Romero, 1997**

El primer procedimiento es el más utilizado por su sencillez, al igual que el tercero cuya diferencia radica en que se divide por la suma de todos ellos en lugar de por el máximo y, además, el procedimiento 3 es comúnmente utilizado en el método de las jerarquías y para la normalización de los pesos. Ambos respetan la proporcionalidad, no ocurriendo lo mismo con el procedimiento 2, pero éste cumple que el peor valor coincide con 0 y el mejor con 1.

Resumiendo, una vez los datos no espaciales se han expresado de un modo cuantitativo, deben ser normalizados para su tratamiento en métodos de EMC, obteniendo, como hemos comentado unos datos comparables y homogéneos necesarios para el análisis.

Los métodos de EMC anteriormente descritos, tiene la finalidad de evaluar cada alternativa, es decir, de establecer el nivel de adecuación de cada elemento espacial, en función de unos criterios propuestos, y de este modo alcanzar el objetivo del análisis. Por otra parte, como ya hemos explicado, previamente se han debido de establecer las valoraciones, los pesos para los distintos criterios y la normalización de los mismos. Por lo tanto, la última fase trataría de ordenar todas las alternativas objeto de estudio y seleccionar entre ellas la que mejor satisfaga el objetivo planteado.

#### **4.6. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y PROPAGACIÓN DE ERRORES**

En los apartados anteriores se han considerado las diferentes técnicas y métodos para abordar un problema de decisión multicriterio. Se ha dado por hecho que la información, espacial o no, de la que se dispone es precisa y certera, pero nada más lejos de la realidad. Todo analista o decisor de este tipo de problemas ha de tener en cuenta que dicha información es normalmente imprecisa e incierta, debido a los errores conceptuales y a los espaciales implícitos.

Tal y como apunta Barba-Romero (1993) “el proceso de ayuda a la decisión no debería terminarse sin un análisis riguroso de los resultados”. Dependiendo del enfoque que se le dé a los errores de los datos de entrada, debemos realizar la distinción entre dos tipos de análisis del error: análisis de sensibilidad (métodos directos), y análisis de propagación de errores o análisis de incertidumbre (métodos indirectos). El primero, pondría de manifiesto los límites de validez y robustez del modelo, donde simulando diferentes escenarios (variando los datos de entrada) se observa cómo se modifican los resultados del modelo. En el segundo caso, está íntimamente relacionado con el anterior pero en el análisis de propagación de errores, los errores son conocidos (incertidumbre de los datos) previamente en el conjunto de los datos de entrada, y por lo tanto, el decisor o analista tiene que tener un conocimiento previo del error asociado a los datos de entrada, para conocer como afectan en los resultados (Malczewski 1999). A continuación, veremos como se llevan a cabo ambos tipos de análisis para la detección de la incertidumbre en un problema de decisión.

Los dos elementos más importantes a considerar en un análisis de sensibilidad son los pesos de los criterios y los valores de los atributos, teniendo incluso más relevancia los primeros. Esto es debido a que los pesos de los criterios son la esencia de los juicios de valor por parte del decisor y se establecen como números subjetivos. Por tanto, variando dichos pesos se ha de observar que repercusión tienen en el análisis. Si la clasificación

de las alternativas permanece invariante, los errores en la estimación de los pesos pueden considerarse insignificante. Si por el contrario, varían los resultados, se llevará a cabo un análisis exhaustivo en la estimación de los pesos (Chen 2009; Malczewski 1999).

Un estudio reciente realizado por Y. Chen (2009) ilustra la dependencia de los parámetros de entrada en el modelo resultante, con el objetivo de identificar los criterios que son especialmente sensibles al aplicar cambios en los pesos y mostrar dicho impacto mediante representación espacial (mapas temáticos). Para abordar este estudio se desarrolla una herramienta en un entorno GIS la cual incorpora un análisis de sensibilidad asociado al método de las Jerarquías Analíticas (AHP). Esta herramienta realiza 200 simulaciones, variando los pesos en cada una de ellas un 1% del valor inicial fijado, en un rango de  $\pm 20\%$  (-20% la 1ª simulación, y +20% la 41ª simulación), para cada uno de los cinco criterios establecidos en ese estudio. Como resultado obtienen 40 mapas con su correspondiente clasificación de alternativas, de cada simulación y para cada criterio. A partir de estos mapas se elige el más adecuado para el estudio y se observa que cambios se han de hacer a los pesos para adaptarlos a la alternativa resultante.

Otra opción ya comentada con el análisis de sensibilidad es la que concierne a los errores en la estimación de los valores de los atributos, debido a un número pequeño de datos o por el propio juicio de valor del analista. En la práctica, los valores de los atributos que encierran un elevado grado de incertidumbre y subjetividad en su estimación deben ser investigados en relación al aspecto conceptual del modelo, para determinar el efecto de su variación en la clasificación de las alternativas.

Gómez y Barredo (Gómez 2005) realizan una clasificación de los diferentes métodos para el análisis de sensibilidad, basada en las ideas de Saltelli (2000), agrupándolos en tres categorías: Métodos Pantalla (screening methods), Métodos locales y Métodos globales.

#### ***4.6.1. Métodos pantalla (screening methods)***

Estos métodos se aplican cuando el número de factores es muy elevado (más de 100) y, por lo tanto, el proceso de cálculo requiere una alta capacidad de computación para ser evaluados. Dentro de este grupo podemos distinguir entre los basados en experimentos de control, como el método Morris y Cotter (ejecución del tipo OAT), y los basados en experimentos factoriales como el IFFD (Iterated fraccional Factorial Design) y el método de Bifurcación Secuencial de Bettonvil. Estos métodos nos indican que factores tienen una mayor influencia sobre los resultados del modelo, así como las posibles interacciones entre los factores. Se fundamentan en seleccionar valores estándares (normalmente de la literatura) de cada factor, y calcular los residuales (diferencia entre los valores estándares y los valores experimentales). El número de evaluaciones suele ser de  $2k+1$ , siendo  $k$  en número de factores, es decir, se ejecuta el modelo para cada factor y sus valores experimentales.

Un ejemplo de métodos pantalla lo describen Crosetto y Tarantola (Crosetto 2001) donde destacan la importante utilidad del método Morris cuando el número de factores es muy elevado y hace inviable computacionalmente la resolución a partir de métodos

globales. El método Morris representa una aproximación en el conocimiento de la incertidumbre de los resultados, clasificando cualitativamente los factores de entrada según la importancia relativa. Este método actúa como un pre-análisis para determinar los factores más influyentes en el modelo (Saltelli 2000).

#### 4.6.2. *Métodos locales*

A diferencia de los anteriores, los métodos locales son cuantitativos, es decir, no solo nos informan de cuales son los factores decisivos en un modelo sino que nos indican en que proporción concreta. Estos métodos muestran cual es el impacto local de cada factor cuando éste varía (en un intervalo reducido,  $\pm 5\%$ ) y el resto permanecen constantes (también se aplica aquí el procedimiento OAT). Son métodos que se utilizan en las ciencias experimentales, tales como la química y la física, y no son aconsejables si los modelos no son lineales. Podemos destacar entre ellos el método de la Fuerza Bruta, Aproximación por diferencias finitas y el método de la Función de Green. Una ventaja de estos métodos es que puede introducirse la variable temporal y observar otro tipo de sensibilidades tales como, las sensibilidades derivadas y las sensibilidades iniciales, cuando se ha alcanzado un tiempo  $t$ .

#### 4.6.3. *Métodos globales*

Estos métodos, al igual que los locales son también cuantitativos, de modo que podemos calcular la cantidad de incertidumbre en los resultados provocada por la propia imprecisión de cada factor de entrada. Los métodos globales son los más completos puesto que estudian todo el recorrido de los factores (variando en todo el rango de incertidumbre) y permiten realizar el análisis variando todos los factores al mismo tiempo. Para tal fin, los factores de entrada deben ser considerados como variables aleatorias donde el resultado del modelo  $E(y)$  puede expresarse mediante la ecuación:

$$E(y) = \int_{\Omega} f(x)p(x)d(x) \quad \text{Ec. 25}$$

donde  $p(x)$  es una función de probabilidad conjunta,  $f(x)$  función de las variables aleatorias,  $d(x)$  su propia función densidad y  $\Omega$  representa el espacio dimensional según el número de variables de entrada.

Dentro de este grupo podemos diferenciar entre métodos basados en muestreos, como el Análisis de Monte Carlo, y métodos basados en la varianza, como el método Sobol' y el FAST (Fourier Amplitud Sensitivity Test). Estos últimos asumen la varianza como valor estándar, es decir, como el indicador responsable de la relevancia de los factores de entrada. A continuación veremos más detalladamente cada uno de ellos.

Saltelli y Tarantola (Crosetto 2001; Saltelli 1999) realizan un estudio intensificando el papel de los métodos globales en un análisis de decisión multicriterio con la finalidad de conocer la incertidumbre de los resultados del modelo a partir de los factores de entrada

establecidos. Este análisis de sensibilidad esta basado en la descomposición de la varianza de donde se obtienen los denominados “índices de sensibilidad”<sup>30</sup> Principalmente, los índices de sensibilidad han sido implementados en contextos relacionados con la programación lineal (método simplex). Apuntan además, la importante diferencia referente al cálculo, mientras que los métodos locales se resuelven a partir de cálculo diferencial y únicamente modelos lineales, los globales emplean integrales multidimensionales en el espacio de variación de los factores de entrada para cualquier tipo de modelo.

Los métodos globales basados en la varianza que describimos a continuación poseen ciertas ventajas que les confieren un carácter realmente interesante para ser utilizados en la realización de análisis de sensibilidad aplicados a variables espaciales en entornos SIG. Estas ventajas son:

- Independencia de los modelos. Estos métodos pueden ser aplicados tanto en modelos lineales como o no, a diferencia de otro tipo de análisis basado en análisis de regresión o correlación
- La sensibilidad medida se basa en explorar el rango completo de variación de los factores establecidos, a diferencia de otros métodos que únicamente son estudiados en un intervalo de valores limitado.
- Se produce un efecto de interacción entre factores debido a la posibilidad de variar varios factores al mismo tiempo<sup>31</sup>.
- La utilización de estos métodos ofrece el conocimiento de los indicadores denominados índices de primer orden (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) y los índices totales ( $S_{Ti}$ , calculados a partir del método FAST extendido) para un factor específico.

Uno de los limitantes más importantes de los métodos basados en la varianza es que deben ser aplicados en aquellos modelos donde los factores de entrada del problema de decisión son independientes.

### **Método Sobol'**

Es un método que se desarrolló a finales de los años noventa por I. Sobol' que se basa en el planteamiento de descomposición de la varianza para el análisis de sensibilidad global, basándose en los Índices de Sensibilidad Total. De modo que la función inicial  $f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  (donde  $x_i$  son las variables de entrada) se puede decomponer en sumandos de los factores de entrada, de manera que:

---

<sup>30</sup> Estos se basan en descomponer la varianza global en términos de primer orden, de segundo orden, etc., y dividir cada uno de ellos entre la propia varianza global, es decir,  $S_{i_1, \dots, i_s} = \frac{D_{i_1, \dots, i_s}}{D}$ , siendo  $S_i$  los índices de sensibilidad,  $D_i$  varianzas parciales y  $D$  la varianza global. Para calcular el número de términos en la descomposición aplicamos  $2^k - 1$ , siendo  $k$  el número de variables

<sup>31</sup> Tradicionalmente, otros métodos han utilizado el denominado OAT.

$$f(x) = f_0 + \sum_{i=1}^k f_i(x_i) + \sum_{1 \leq i < j \leq k} f_{ij}(x_i, x_j) + \dots + f_{1,2,\dots,k}(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad \text{Ec. 26}$$

Del mismo modo la varianza total del resultado del modelo podríamos descomponerla:

$$D = \sum_{i=1}^k D_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} D_{ij} + \dots + D_{1,2,\dots,k} \quad \text{Ec. 27}$$

Entonces, el índice de sensibilidad de primer orden,  $S_i$ , y la sensibilidad estimada se definirían como:

$$S_i = \frac{D_i}{D} \quad S_{i_1 \dots i_s} = \frac{D_{i_1 \dots i_s}}{D} \quad \text{para } 1 \leq i_1 < \dots < i_s \leq k \quad \text{Ec. 28}$$

Por ello, Saltelli (1999) propone un resumen de estos cálculos introduciendo el Índice de sensibilidad Total (TS) que se definiría como la suma de todos los índices de sensibilidad calculados para cada factor del modelo. Poniendo el ejemplo de tres factores:

$$TS(x_1) = Sx_1 + Sx_{12} + Sx_{13} + Sx_{123} \quad \text{Ec. 29}$$

Este índice tiene como finalidad identificar aquellas variables que no son esenciales en el modelo, de modo que el modelo podría ser simplificado.

El método Sobol' tiene el gran inconveniente de que a nivel computacional requiere elevados recursos, es decir, conllevan una carga y esfuerzo computacional elevados provocado por el cálculo de los índices dependiendo de: el número de combinaciones que se producen y por el número de variables de entrada (Ascough 2005; Gómez 2005).

### **Método FAST (Fourier Amplitude Sensitivity Test)**

El desarrollo del método FAST comenzó en la década de los setenta. Su fundamento es básicamente igual que el método Sobol' utilizando los índices de sensibilidad vistos, pero con la diferencia de que mediante la transformada de Fourier convierte a la integral de los datos de entrada con incertidumbre multidimensional en unidimensional. Empleando las propiedades de las series de Fourier, podríamos aproximarnos a la varianza de  $y$ , según la ecuación:

$$Var(y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f^2(s) ds - [E(y)]^2 \quad \text{Ec. 30}$$

donde,

$$E(y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(s) ds$$

Para definir,  $E(y)$  es necesario conocer  $w_i$  que es la frecuencia con la que varía  $x_i$ , así como  $g_i$  que son las funciones de transformación para cada variable  $i=1, \dots, k$ , y  $s$  es el parámetro independiente para todas las variables que varía entre  $-\pi, \pi$  de tal forma que:

$$x_i = g_i(\text{sen } \omega_i s)$$

A partir de éstas funciones de transformación se obtendrán muestras de los factores de entrada a utilizar en el análisis de sensibilidad.

Saltelli, Tarantola y Chan desarrollaron el denominado método FAST Extendido el cual tiene el mismo fundamento que el método FAST con la ventaja de que se pueden calcular los índices de efecto total. Esto quiere decir que no sólo se determina el efecto de cada factor individualmente sino también el efecto de interacción con el resto, ambos obtenidos mediante la misma ejecución.

Existen otros métodos para analizar la sensibilidad de los factores de entrada que pueden ser consultados en la bibliografía, tales como Response Surface Method (RSM) o el Mutual Information Index (MII) (Ascough 2005; Saltelli 2000).

#### 4.6.4. Propagación del error

Crosetto y Tarantola (Crosetto 2001) establecen la estrecha diferencia, basándose en la ideología de Saltelli (2000), entre un análisis de incertidumbre (uncertainty análisis, UA) y un análisis de sensibilidad<sup>32</sup> (sensitivity análisis, SA). Como hemos descrito anteriormente, un análisis de sensibilidad identifica cuantitativamente aquellos factores de entrada que mas afectan a los resultados del modelo, es decir, en que proporción el modelo depende de la información (espacial o no) que lo abastece. Por otro lado, un análisis de incertidumbre se centra en cómo la incertidumbre de los datos de entrada, parámetros del modelo, etc., se propagan a través del modelo y afecta a los resultados de dicho modelo. A continuación se aborda más detenidamente diversos aspectos del análisis de incertidumbre tales como, tipos de incertidumbre, cuándo aplicarlo, que se obtiene, etc.

En todo proceso de evaluación multicriterio se ha de considerar el tratamiento de la incertidumbre y la propagación de errores a través del modelo. En general, un análisis del error en el contexto de que estamos abordando (espacial multicriterio) pretende evaluar el efecto de dichos errores (asociados a los mapas de criterios y a los pesos otorgados) en los resultados, es decir, en las alternativas. Los datos geográficos están

---

<sup>32</sup> Existen muchos sinónimos para estos términos que hay que tener en cuenta dependiendo de la literatura consultada, por ejemplo para el UA: error modelling, uncertainty modelling, geographical error análisis, etc., y para SA: geographical sensitivity analysis, quantification of the contribution made by different components to propagated error, etc.

sujetos a procesos de generalización y discretización previamente a ser utilizados en una EMC-SIG. Esto implica que los mapas de criterios producidos para el análisis contendrán intrínsecamente errores, diferenciando entre errores posicionales (medición) o conceptuales (en los atributos).

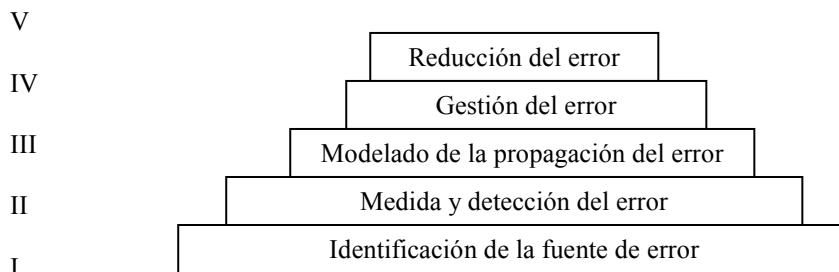
El error de medición se define como la diferencia entre el valor medido y el valor real (Malczewski 1999). La distribución de errores normalmente se comporta como una distribución normal y se mide a partir del Error Medio Cuadrático (RMS, root mean Square), mediante la fórmula:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_i (X_i - X_{it})^2}{n-1}} \quad \text{Ec. 31}$$

donde  $X_i$  es el valor de la muestra,  $X_{it}$  es el valor “real”, y  $n$  es el número de muestras. Por ejemplo, los errores relacionados con un modelo digital de elevaciones se definen a partir de este error, al igual que todos los elementos de estructura vectorial (puntos, líneas y polígonos). Sin embargo, otro tipo de datos definen sus errores a partir de la denominada matriz de confusión<sup>33</sup>.

Pero además de los errores que se producen en los mapas de criterios, deben ser considerados aquellos que son introducidos en el modelo por la subjetividad y preferencias (juicios de valor) del decisor o analista del problema de decisión. Esta se denomina incertidumbre preferente y se define como la diferencia entre el valor medido (pesos de los criterios) y el valor real. Puesto que el valor real no es posible conocerlo, la incertidumbre siempre será una estimación de los límites del error en una medición.

Gómez y Barredo (Gómez 2005) avanzan un paso en relación al control de la propagación de errores en un entorno SIG. Plantean un esquema donde no sólo se identifica y se mide el error (incertidumbre) sino también se modela, se gestiona y se intenta reducir, tal y como muestra la Figura 16.



**Figura 16. Esquema de las operaciones realizadas para el tratamiento del error. Fuente: Gómez y Barredo, 2005**

<sup>33</sup> Se trata de una matriz donde los elementos ubicados en la diagonal principal corresponderían al número de elementos correctos que pertenecen a dicha clase, mientras que los elementos fuera de la diagonal son los elementos erróneos. Además, estas matrices van acompañadas del índice Kappa que mediría la relación entre el patrón espacial predicho y el observado para una muestra.



En primer lugar, es necesaria la identificación del error, desde sus diversas vertientes, espacial, temática y temporal, tales como de asignación, de generalización de clases, de generalización espacial, de entrada de datos, errores derivados del modelo de datos (vectorial, raster, etc.), de procesamiento y conceptuales. Se tiende a utilizar métodos gráficos para tal fin utilizando el denominado Análisis Exploratorio de Datos. Respecto a la medición del error, hemos comentado anteriormente para el caso de la componente espacial y temática (cuantitativas) la aplicación del Error medio cuadrático, y en el caso de componentes cualitativas las matrices de confusión. Otros errores son el resultado de procesos de digitalización, derivados propios de la transformación entre modelos de datos de la componente espacial, y la integración de datos provenientes de muy diferente naturaleza.

Una vez la detección y medición del error se ha producido, deberíamos encontrar métodos o estrategias para eliminarlos o reducirlos, en cualquier caso. Pero esto no siempre es factible, y aun menos en un entorno SIG (deberíamos tener una gran cantidad de datos y de una calidad elevada). Para estudiar la propagación de errores los métodos estadísticos más utilizados son los métodos analíticos (Series de Taylor) y el análisis de Monte Carlo.

### **Series de Taylor**

Éstas se basan en la suposición de que la varianza total de la variable de salida de un modelo es una función de las varianzas de las variables de entrada. En estas series, únicamente el primer término es considerado relevante, siendo este la derivada de la función (valor de una alternativa  $i$ ,  $V_i$  y  $n$  criterios):

$$V_i = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad \text{Ec. 32}$$

y el efecto de la propagación de errores en  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  sobre el valor de  $V_i$  según:

$$\sigma_{vi} = \left[ \sum \left( \frac{\delta V_i}{\delta x_j} \sigma_{xj} \right)^2 \right]^{0.5}$$

donde  $\sigma_{V_i}$  es la desviación estándar de  $V_i$ ,  $\sigma_{x_j}$  es la desviación estándar del criterio  $x_j$  y  $\delta V_i / \delta x_j$  es la variación de la función  $f$  con respecto a  $x_j$ .

### **Análisis de Monte Carlo**

El análisis de Montecarlo es uno de los métodos más extendidos y utilizados, debido principalmente a su sencillez en la implementación y por obtener datos concretos de la propagación del error. El único inconveniente podría darse en modelos complejos por la elevada carga computacional necesaria para resolver las repeticiones. Estas repeticiones

determinaran el dato de error cuya precisión está inversamente relacionada con la raíz cuadrada del número de ejecuciones. En general, podríamos decir que este método es una manera de evaluar un gran número de escenarios, donde cada escenario está representado por un conjunto de variables aleatorias con una determinada función de probabilidad normal y unos parámetros de entrada. El objetivo es encontrar la relación entre los datos de partida del modelo y los resultados, y examinar la distribución del error obtenido, calculando la desviación típica como indicador final. Existen diversos procedimientos para alcanzar el objetivo como son: gráficos de nubes de puntos (scatterplots), coeficientes de correlación, análisis de regresión, transformación ordenada, etc.

Una vez se ha establecido el error y su propagación es una práctica habitual representar dichos errores mediante mapas de probabilidades, con la finalidad de localizar cuales son las zonas del territorio bajo estudio mayormente afectadas por dichos errores. La identificación de dichas áreas refleja donde es conveniente actuar para reducir ese error. Para concluir con el proceso de tratamiento del error, detallaremos brevemente la fase de reducción del error. Si bien existen diversas propuestas en relación a la reducción de errores tales como la fijación de un umbral, ninguna de ellas se ha establecido con rigor. Ante esta situación en el entorno SIG, será el propio analista el que decida que nivel de error está dispuesto a asumir, y esta situación dependerá de la finalidad del estudio. No existen herramientas integradas en los SIG para llevar a cabo este tipo de análisis por lo que debe recurrirse a programas externos.

Como última aportación a cerca de la valoración de la incertidumbre, debemos mencionar la clasificación de la misma y las aplicaciones prácticas en la obra de Voodg (1983). Existen diversos tipos de incertidumbre que hacen referencia a datos espaciales en una evaluación multicriterio, tales como, la incertidumbre de los criterios, la incertidumbre de la valoración, la incertidumbre de la prioridad y la incertidumbre del método. El autor resalta la importancia de la representación de los resultados de la evaluación, separada del análisis en sí mismo, para una mayor claridad y una contra-valoración por otros expertos. Los resultados deben representarse a partir de tablas, figuras y esquemas para un mayor entendimiento por terceros.

#### ***4.7. VALORACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ACOGIDA DE UN TERRITORIO APLICANDO TÉCNICAS DE EMC-SIG***

##### ***4.7.1. Técnicas para la evaluación de impacto ambiental***

Aunque en este trabajo las técnicas que se tratan son los Sistemas de Información Geográfica, la Evaluación Multicriterio y la Programación Lineal, existen otras técnicas para la evaluación de un impacto ambiental de un proyecto, así como para la selección de sus alternativas o incluso la valoración de las mismas (Munier 2004). Nos referimos a técnicas como el método de Valoración Contingente, el Análisis de Coste-Beneficio, el Análisis de Coste-Efectividad, el Análisis de datos de entrada-salida y el Análisis del Ciclo de Vida. El autor ilustra estas siete técnicas de evaluación de impacto ambiental con un caso de estudio de naturaleza muy diversa para cada una de ellas.

Se puede entender el impacto ambiental al concepto que “indica la alteración que la ejecución de un proyecto introduce en el medio, expresada por la diferencia entre la evolución de este sin y con proyecto”, o en términos generales como “el efecto que una determinada actuación produce en los elementos del medio, o en las unidades ambientales, efecto que puede ser beneficioso, es decir, positivo o negativo”. Este se consigue determinar a partir de la importancia relativa de cada factor.

Las causas que producen una situación de impacto ambiental pueden ser de diversa naturaleza, aunque principalmente en impactos negativos podemos destacar: cambio de usos del suelo, emisiones de agentes contaminantes, sobreexplotación de recursos naturales y/o ecosistemas, y subexplotación de recursos naturales y/o ecosistemas. En la obra de D. Gómez (Gómez 1992) se describen estos casos detalladamente, pero por no ser el objetivo de este trabajo no entraremos en dicha materia.

La planificación en términos generales se puede definir como un proceso racional de toma de decisiones, es decir, un intento inteligente organizado para elegir las mejores alternativas tendentes a realizar metas específicas. No obstante, utilizando técnicas de EMC y SIG podríamos considerarlo como un acercamiento a la planificación física, la cual es entendida como “la previsión y control de los usos del suelo mediante una adecuada distribución de las actividades del territorio”(Gómez 1992).

El mismo autor define la aptitud del territorio como el conjunto de requisitos locales que debe poseer un lugar para poder acoger una actividad o uso, variando los factores establecidos. Este enfoque se adapta perfectamente a la EMC, por tratarse de una manera resumida de evaluar una serie de factores/criterios a partir de un objetivo común. Como hemos mencionado, a estos criterios se les asigna un peso (importancia en función de su relevancia comparada con el resto de criterios) para la actividad evaluada. No obstante la metodología que expone y plantea este autor para la capacidad de acogida se basa en el modelo impacto – actitud.

#### ***4.7.2. Factores que intervienen en la localización y evaluación de una actividad***

En primer lugar, antes de comenzar a detallar aquellos factores que podrían intervenir en la localización de instalaciones o actividades, debemos recabar en la capacidad de acogida de un territorio para dicha actuación. Hay diversas maneras de definir las pero en el ámbito que nos concierne podríamos entenderla como “la sumatoria de los factores positivos, menos la sumatoria de los factores negativos a la actividad evaluada, obteniendo para cada lugar del territorio un determinado valor que refleje la capacidad” (Gómez 2005). Otro criterio para acercarnos al concepto de acogida es la aptitud, referida al conjunto de requisitos locales que debe poseer un lugar para acoger una determinada actividad, estableciéndose un rango de aptitudes para una actividad en un territorio dado. Este enfoque es el comúnmente utilizado en la EMC donde a cada criterio se le asigna un peso según su adecuación a la actividad que se esté evaluando aplicando alguna de las técnicas detalladas anteriormente. Por ejemplo, la aptitud de un suelo para la instalación de un vertedero controlado. En función de las cualidades del suelo, del uso actual, etc., se establecerá un peso para cada criterio.

Siguiendo el hilo de este ejemplo, debemos hacer mención al impacto que produce la instalación de esta actividad. Por ello, Gómez Orea (1992) hace hincapié en un segundo enfoque de la capacidad, que sería el modelo aptitud-impacto, definiéndolo como la aptitud de un territorio para cada uso y el impacto potencial generado por los usos planteados sobre el medio. El impacto sobre un territorio puede tener diversos orígenes, desde la emisión de contaminantes hasta la sobreexplotación de recursos naturales o un cambio drástico de usos del suelo.

La fase de mayor responsabilidad y la que va a tener un gran peso en un estudio de evaluación de la capacidad de acogida de una determinada actividad, es la selección de los factores y criterios que van a influir directamente en dicha actividad. Como cabe esperar, son muchos los factores que pueden ser tenidos en cuenta para la realización de estudios del territorio, y dependiendo del objetivo del estudio, de la información que se disponga, etc., se escogerán unos u otros. La elección de un conjunto válido de criterios es la base de todo el proceso de EMC ya que en esta fase se valoran los que serán finalmente asignados a las alternativas. Los cuatro conjuntos de factores considerados por D. Gómez (Gómez 1992) son:

- *Factores basados en patrones pasados de desarrollo:* considerándose el más influyente el que actualmente existente, puesto que cambios drásticos conllevan elevados recursos económicos y humanos.
- *Factores relativos al medio natural:* principalmente morfología del terreno, vegetación, paisaje, riesgos naturales, etc., pudiendo actuar como conductores o limitantes.
- *Factores relativos a las características espaciales:* distancia, accesibilidad aglomeración, el tamaño y la forma, etc., valorando cuestiones relacionadas como la distribución, interconexión, funcionalidad y usos del espacio. Otros elementos importantes también serían la viabilidad o los medios de transporte.
- *Factores basados en otro tipo de determinantes locacionales:* tradición, nivel de desarrollo económico, sistema económico social, las elecciones políticas de índole territorial y las preferencias personales. Este es un conjunto difícil de valorar por su carácter temporal y humano.

Si bien los factores de localización comentados son una excelente base para definir los criterios, diversos autores han propuesto una serie de agrupaciones para determinar de una manera genérica las variables a considerar para estudios del medio con fines de planificación u ordenación.

- **Clima:** precipitación, temperatura, inundaciones periódicas
- **Geología:** tipo de roca, formaciones estables, morfología, etc.
- **Fisiografía:** drenaje superficial, pendientes, características del suelo, valor
- **Suelos:** tipo de suelo, textura, profundidad, erosionabilidad, capacidad portante, inestabilidad, productividad, etc.
- **Hidrología:** protección de la calidad de vertientes, acuíferos, potencial de inundaciones, etc.
- **Edafología:** drenaje del suelo, condiciones de formación del basamento, erosión
- **Topografía:** altitud, pendientes, variaciones del relieve, orientación, etc.
- **Vegetación:** tipo de vegetación, calidad, cultivos, áreas forestales, asociaciones naturales, densidad, etc.

- Paisaje: paisaje intrínseco, potencial de visualización, incidencia visual, etc.
- Actividad humana: paisajes y equilibrios antrópicos, cultivos y otros aprovechamientos, asentamientos, accesibilidad al territorio, etc.
- Usos del suelo: valor escénico, recursos recreativos, potenciales o existentes
- Independientemente del objeto del estudio, hay un grupo de variables estrechamente relacionadas con el medio físico que son comunes en la mayoría de los estudios. Eso no quiere decir que todas se evalúen y se ponderen de manera análoga. Estas variables serían: pendiente, usos del suelo, litología, altitud, morfología, hidrografía, redes de transporte, áreas urbanas, calidad del paisaje, espacios protegidos, accesibilidad, etc.

#### **4.8. IMPLEMENTACIÓN DE UNA EMC EN UN ENTORNO SIG**

Materializando la teoría vista anterior, ésta debe obtenerse a partir de capas temáticas (mayoritariamente entidades poligonales), las cuales nos servirán para, a partir de un objetivo planteado, establecer los criterios a través de los cuales se evaluará la aptitud de cada uno de los factores que intervendrán en el uso o actividad que se va a desarrollar en ese territorio.

Como ejemplo de implementación y aplicación concreta de un EMC (basado en técnicas GIS) para la gestión de residuos, podemos citar a Bórdas (2006). En el artículo se ven reflejadas las principales etapas que debe seguir una EMC, los cuales son: 1) establecer los criterios para el cumplimiento del objetivo, 2) determinar los factores y las variables del estudio, 3) desarrollar reglas de decisión, como por ejemplo el Análisis del punto ideal o la Sumatoria Lineal Ponderada, 4) establecer el peso asociado a cada factor y 5) obtención del mapa de capacidad de acogida para el objetivo del estudio y su valoración. LIGRE es el nombre de la aplicación realizada para la localización de Instalaciones de gestión de residuos, cuyo objetivo principal es realizar una primera valoración a gran escala, con el propósito de obtener una clasificación orientativa de las zonas aptas para tal fin. Para dicha valoración esta aplicación lleva implementado dos métodos de decisión multicriterio: ponderación aditiva y el método PRES desarrollado por el Departamento de Proyectos de la Universidad Politécnica de Valencia (Gómez-Senent 1998).

Otro ejemplo concreto de integración de los SIG y las técnicas de EMC lo presentan Mena et al. (2006) mediante un estudio de ordenación y planificación territorial en Chile, desarrollando un modelo de capacidad de acogida para la localización de un vertedero de residuos urbanos. Para ello divide el estudio en cuatro fases, siendo éstas: 1) Una primera fase de recopilación de información, definición de factores y limitantes (permeabilidad de suelos, clases de suelos, distancias, topografía, proximidad a los cursos de agua y áreas urbanas, vegetación, especies protegidas, etc.), 2) la segunda fase se aplica una técnicas de EMC, en concreto las Jerarquías Analíticas, y la ponderación a partir de la Sumatoria lineal ponderada (visto en apartados anteriores), 3) La tercera fase describe la verificación del modelo de capacidad de acogida basándose principalmente en trabajo de campo, y 4) la última fase son la presentación de resultado y su discusión, observándose que las zonas con categoría muy alta se trata de terrenos agrícolas, relativamente planos, utilizados para el cultivo de arroz y trigo, así como otros poblados por matorrales y para el pastoreo.

Olga de Cos (2007) nos presenta el estudio realizado mediante técnicas multicriterio en entornos SIG (ráster principalmente) cuyo objetivo el desarrollo de una metodología para la estimación del grado de metropolización en los municipios próximos al que aloja la ciudad de Santander. Para ello, establece los criterios (factores y restricciones) necesarios para alcanzar el objetivo, siendo concretamente: la ocupación del suelo, población residente, la actividad productiva y la interrelación espacial. La ponderación de estos criterios la determina a partir de la comparación por pares, con la que se mide la importancia relativa de cada factor comparados con el resto.

El software IDRISI ha desarrollado diversos módulos donde se exploran procedimientos específicos de localización multiobjetivo para objetivos que entran en conflicto. Uno de estos módulos denominado Multi-criteria Evaluation es el principal a la hora de formar las matrices de evaluación, aunque con una limitación muy importante respecto al número de factores que pueden ser combinados no pudiéndose superar el número de  $16^{34}$ . Este modulo se basa en el método de comparación por pares (Jerarquías analíticas de Saaty) por tratarse del más eficiente en un ámbito multiobjetivo. Otro de los módulos destacados es el WEIGHT, en el cual se introduce la matriz de comparación por pares obteniendo así los valores de los pesos de cada factor. Este es uno de los SIG raster más empleados en planificación empresarial, territorial y ambiental. Podemos ver varios ejemplo de aplicación en el libro de Gómez y Barredo (Gómez 2005).

Arcila Garrido (2003) nos presenta varios ejemplos de la integración de los Sistemas de Información Geográfica en el campo de investigación medioambiental, clasificando su aplicación en cinco apartados: 1) Inventarios y cartografías ambientales, 2) Estudios ambientales y análisis del paisaje, 3) Análisis de riesgos e impactos ambientales, 4) Modelización ambiental, y 5) Planificación y gestión ambiental. Un ejemplo de aplicación en este ámbito es GISPLANA, donde están integrados un Sistema de Apoyo a las Decisiones (SADE) desarrollado por el CEDEX<sup>35</sup>, Grass 4.1 como SIG y una interface gráfica de usuario (IGU). Con dicha aplicación se pretendía predecir las frecuentes inundaciones que sacuden al levante español.

No obstante, existen algunos problemas importantes para un correcto uso de la EMC dentro de un SIG. En especial el amplio número de alternativas habitualmente existentes en un problema de planificación territorial (en muchas ocasiones las alternativas coinciden con los puntos del territorio) dificulta el empleo de muchas Técnicas de Evaluación Multicriterio. La razón estriba en que algunas de las reglas de decisión usadas en ellas a veces no son capaces de comparar entre sí, en un período de tiempo razonable, todas las alternativas. Por ello, lo habitual es utilizar reglas de decisión compensatorias, en ellas el mecanismo de combinación de los criterios permite que las valoraciones bajas en uno o varios factores se compensen con el valor alto en uno (o más de uno) de los restantes factores. De este modo la solución elegida puede resultar poco adecuada en alguno de los factores. Frente a ellas se encuentran las reglas de decisión no compensatorias: en este caso la combinación de los factores es de tal tipo que no permite compensar valores bajos en unos factores con los más elevados de otros factores.

---

<sup>34</sup> Existen otros softwares como el BEST CHOICE, MICROQUALIFLEX o el DECISION PAD que permiten utilizar 250 alternativas y 250 criterios (Gómez 2005).

<sup>35</sup> El Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, adscrito los Ministerios de Fomento y de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino.

#### **4.9. COCLUSIONES DEL CAPÍTULO**

Las técnicas de evaluación multicriterio resultan una herramienta muy útil en una gran diversidad de problemas enmarcados en la ordenación del territorio, siendo una aproximación muy válida para evaluar y analizar zonas antes de llevar a cabo una decisión política o un proceso de planificación. En el momento que un proceso de EMC empieza un gran número de elementos deben ser tenidos en cuenta, tales como el objetivo a alcanzar, los factores implicados (criterio o limitantes), los pesos, las diferentes matrices, la elección de la reglas de decisión, etc.

Los distintos métodos o técnicas de EMC que hemos presentado se diferencian básicamente en los procedimientos aritmético-estadísticos que se realizan sobre las matrices de evaluación de prioridades, a partir de la cual se obtendrá una evaluación final de las alternativas. Según el método empleado se efectúan distintas operaciones que pueden ser simples como en el caso de la Sumatoria Lineal Ponderada (utilizado frecuentemente en modelos desarrollados con SIG), o más complejos con el Análisis del punto ideal, el análisis de Concordancia-Discordancia, y la misma programación lineal vista en el capítulo anterior.

Se ha presentado una clasificación de las técnicas de EMC basada en la ya presentada por P. Jankowski a finales de los noventa. En ella se diferencian tres grupos: compensatorias, no compensatorias, y la más vanguardista, la lógica difusa. Destacamos en las técnicas compensatorias las Jerarquías Analíticas de Saaty, la Sumatoria Lineal como aditivas y el Análisis del punto ideal. Esta última frente a la Sumatoria Lineal ofrece la ventaja de que en el análisis del punto ideal no se efectúan operaciones entre los valores de las alternativas ya que se calculan distancias a un punto ideal. Esto implica que en los valores de las alternativas aplicando la Sumatoria Lineal sí se manifiesta el efecto de compensación, y un valor bajo puede quedar “enmascarado” por un conjunto de valores altos (al ponderarse todos juntos).

La elección de los criterios y factores de evaluación (criterios ponderados), va a incidir de forma notable en todo proceso de evaluación y los resultados quedarán afectados por la exclusión o inclusión de algunos criterios. La asignación de valores a estos criterios y el peso de los mismos está basada en un conjunto de juicios de valor y, por lo tanto pueden ser reconsiderados y debatibles por un conjunto de especialistas.

Una característica a destacar del método del punto ideal respecto a los métodos aditivos, como por ejemplo la Sumatoria Lineal, es que los métodos de Análisis del punto ideal denotan una menor compensación, puesto que en la sumatoria lineal los valores de cada alternativa se producen por adición, lo que puede enmascarar valores bajos en varios criterios frente a un valor alto en uno solo.

Las técnicas no compensatorias descritas han sido cuatro: conjuntiva, disyuntiva, lexicográfica y de eliminación de atributos. Éstas requieren un menor nivel de conocimiento por parte del analista, aunque por otra parte, debido a la estrategia reductora que siguen, en el procedimiento se llega a una alternativa comparativamente peor.

En el caso de técnicas borrosas en un entorno GIS puede complicarse notablemente si partimos de un problema con un número elevado de criterios, puesto que el número de imágenes que habría que crear también sería elevado. Además, la asignación de los pesos también se complica considerablemente al aumentar el número de variables.

Como se ha planteado, existe un gran número de procedimientos de EMC con diferentes propiedades y estrategias en su aplicación, aumentando la indecisión a la hora de seleccionar uno de ellos. Es por ello, que la combinación de métodos en una misma evaluación es un proceso factible, por ejemplo, utilizando inicialmente un procedimiento no compensatorio para reducir el conjunto de alternativas, y posteriormente uno compensatorio para obtener el orden de las mismas.

Finalizada la fase de la evaluación de alternativas, una vez se ha aplicado un método de EMC para abordar un problema de decisión, es necesario llevar a cabo un análisis de sensibilidad, es decir, un análisis riguroso de los resultados. Para ello en este capítulo se han dividido los métodos comúnmente utilizados en tres categorías: métodos pantalla, métodos locales y métodos globales. A diferencia de los métodos pantalla que son cualitativos, los métodos locales y globales son cuantitativos, de modo que podemos calcular la cantidad de incertidumbre en los resultados provocada por la propia imprecisión de cada factor de entrada. Los métodos globales son los más completos puesto que estudian todo el recorrido de los factores, además de ser los más apropiados para ser empleados en entornos SIG. Destacamos los métodos de tipo global como el Método Sobol y el método Fast, como métodos para comprobar la robustez de modelo planteado, y no, como se realiza en la mayoría de los estudios, de variar la elección de los criterios, la ponderación, las alternativas finales o el propio método de EMC, para demostrar que se alcanzan los resultados deseados.

Sin embargo, la integración de las técnicas de EMC y SIG siguen planteando determinados inconvenientes en el momento de llevar a cabo un problema de análisis espacial, como es el caso de la ordenación del territorio, localización de actividades, gestión de recursos naturales o contaminación ambiental. Uno de los principales inconvenientes es la dificultad de aplicar los métodos de EMC basado en la comparación por pares con un gran número de datos. Por otra parte, en la mayoría de los casos, un SIG no tiene implementados la mayoría de los métodos EMC. Esta situación queda subsanada con el hecho de que actualmente existe una gran diversidad de aplicaciones independientes (módulos específicos) que pueden ejecutarse en el SIG disponiendo de una herramienta más completa.







---

## **CAPÍTULO 5.**

### **EVALUACIÓN, ESTRATEGÍAS LOGÍSTICAS Y TRANSPORTE DE LOS RECURSOS BIOMÁSICOS. METODOLOGÍAS PARA LA LOCALIZACIÓN DE PLANTAS DE BIOMASA**

---

*En este capítulo se aborda la localización óptima para una planta de biomasa mediante la aplicación de Sistemas de Información Geográfica desde tres perspectivas distintas. En el primer caso, se desarrolla y se presenta una metodología integral para optimizar el aprovechamiento energético de los recursos. En la segunda aplicación metodológica se hace uso de las técnicas de evaluación multicriterio en entornos SIG, determinando las zonas aptas para la instalación de dichas plantas. Y Finalmente, la aplicación de determinados modelos de localización basados en programación lineal en entornos SIG, optimizan dicha ubicación a la vez que se describen las estrategias logísticas y los costes de estos residuos.*



### 5.1. INTRODUCCIÓN

Hemos planteado en el transcurso de este trabajo y a partir de una extensa revisión bibliográfica que son muchas las variables que entran en juego a la hora de localizar una instalación como por ejemplo, la cuantificación y localización del recurso, las infraestructuras existentes, las limitaciones ambientales, actividades o usos beneficiosos, los centros de consumo, entre otros muchos aspectos. El caso de estudio que planteamos es el de la localización de una planta de biomasa abastecida por residuos agrícolas y forestales.

El hecho de completar un gran número de variables conlleva el desarrollo de metodologías o técnicas para una integración de las mismas con la finalidad de responder al objetivo planteado. Es por ello, que en este capítulo se aborda el problema de la localización óptima de una planta de biomasa desde diferentes perspectivas: Sistemas de Información Geográfica, Evaluación Multicriterio en entornos SIG y modelos de localización formulados mediante programación lineal implementados en un SIG. A continuación, hacemos un resumen de las mismas para presentar al lector la esencia de cada una de ellas.

En el primer caso, destacamos la importancia y la perfecta integración de los sistemas de información geográfica como herramienta para fusionar el conocimiento geográfico y el ámbito energético referido a los recursos biomásicos, concretamente su distribución espacial, tipología, caracterización, producción energética y costes. Se parte del proyecto BIODER, descrito en el capítulo 1, el cual está dividido en dos fases claramente diferenciadas: 1) evaluación y caracterización de los recursos biomásicos y 2) optimización de la logística y el transporte en la fase de recogida y distribución de la biomasa. Esta segunda fase tiene como finalidad la localización óptima de la planta de biomasa en cada una de las comarcas de las tres provincias bajo estudio: Ciudad-Real, Lugo y Valencia.

En el segundo caso, se pone de manifiesto la utilización de los Sistemas de información Geográfica y los Métodos de Evaluación Multicriterio con procedimientos que pueden ser adaptados a los diferentes procesos que involucran dichos métodos. La diversidad de factores que inciden en la evaluación, logística y transporte de la biomasa agrícola y forestal, requieren de la definición de un proceso integral. El procedimiento que se plantea en primera instancia es la determinación de un primer conjunto de soluciones al problema de localización mediante técnicas EMC-SIG en la comarca de Utiel-Requena. Para ello se requiere de la consideración de criterios englobados en aspectos logísticos, ambientales y socioeconómicos, de donde se derivan las alternativas posibles para la localización de una planta. Para la obtención de los resultados donde se identificarán las mejores alternativas para la localización de la planta (zonas aptas) se proponen dos técnicas con diferente naturaleza, la sumatoria lineal ponderada y el análisis del punto ideal.

En el tercer y último caso, la identificación de la solución óptima se obtiene de la aplicación a las zonas aptas preseleccionadas a partir de la EMC anterior, los modelos de localización-asignación en un entorno SIG. Estos modelos, formulados mediante programación lineal, son materializados a partir de un módulo de análisis de redes en el cual están implementados diversos modelos. Concretamente, presentamos en este

capítulo los resultados obtenidos empleando: 1) modelo p-mediano con y sin implantación de centros de transferencia, 2) modelo de máxima cobertura con y sin implantación de centros de transferencia y 3) matriz origen-destino.

## **5.2. METODOLOGÍA DESARROLLADA EN EL PROYECTO BIODER BASADA EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

En este apartado se explica de manera resumida y simplificada la metodología desarrollada y aplicada en el proyecto BIODER (concedido por el Ministerio de Ciencia e Innovación en el marco de Proyectos de Investigación del Plan Nacional). En el Anexo II se encuentra toda la información (cartográfica y estadística), justificación, formulación y resultados de dicho proyecto.

### **5.2.1. Resumen de la metodología basada en SIG del proyecto BIODER**

La metodología desarrollada se ha aplicado al estudio completo de tres zonas con necesidades energéticas y distribución del territorio sensiblemente diferente, concretamente se han seleccionado:

- La provincia de Lugo como representación de un escenario con elevada superficie forestal
- La provincia de Ciudad Real, como representación del escenario con una gran ocupación del suelo por cultivos de secano (herbáceos, vid, olivar).
- La provincia de Valencia, como representación de escenario mixto, compartiendo zonas forestales y cultivos agrícolas.

Las fuentes de información, tanto estadísticas como cartográficas se han obtenido de organismos oficiales nacionales de manera que esta metodología pueda ser aplicada en otras áreas. Las fuentes tanto estadísticas como cartográficas pueden consultarse en el capítulo 1 apartado 1.5.

### **5.2.2. Evaluación y caracterización de los recursos de la biomasa**

Para determinar la biomasa que se genera en una región es necesario conocer los cultivos de dicha área de estudio y su distribución espacial. En este estudio se adopta como una de las herramientas fundamentales los Sistemas de Información Geográfica que posibilitan la actualización, identificación y cuantificación de la biomasa en cada zona a partir de sus características energéticas y geográficas. A partir de aquí, se ha desarrollado la metodología siguiente que permite localizar las ubicaciones óptimas de centrales de bioenergía a partir de la biomasa generada en la cada región, a la vez que optimizar todos los aspectos logísticos implicados mediante un análisis de redes.

### **5.2.2.1. Obtención y caracterización de la biomasa agrícola y forestal**

Para obtener la biomasa agrícola generada, tanto teórica como disponible, por cada especie se ha empleado como cartografía base la facilitada por el Ministerio de Agricultura, Mapa de Cultivos y Aprovechamientos de España, donde podemos conocer la ocupación de las distintas especies y aplicar las ecuaciones y coeficientes pertinentes para su evaluación (ver Anexo II).

El cálculo de la biomasa forestal, tanto teórica como disponible, se ha basado principalmente en el Tercer Inventario Forestal Nacional (IFN3) facilitado por el Ministerio de Medio Ambiente, donde se detalla gran cantidad de información, como la especie arbórea, la ocupación, el estrato, el estado, el volumen con corteza, la fracción de cabida cubierta, etc. A partir del Volumen Con Corteza, que es la clave junto con el Estrato y el Número de Pies podremos calcular la biomasa forestal.

Además, se ha realizado la agrupación de cultivos para determinar la caracterización de la biomasa (humedad, poder calorífico y la ceniza) procedente de residuos agrícolas que se gestiona en la planta de biomasa donde ésta será tratada y procesada.

### **5.2.2.2. Puntos de aportación de biomasa y obtención de la densidad superficial**

Se consideró una mínima unidad de información, tanto de origen (aportación de biomasa) como destino (posible ubicación de la planta). Esta unidad se identificó con un punto, siendo éste el centroide de cada cuadrado de 1km<sup>2</sup> que forma una malla regular, la cual cubre toda la zona de estudio. Cada centroide tiene asignado el valor de la biomasa disponible según los tipos de cultivo que cada unidad mínima encierra, además de otros atributos.

Conociendo los valores de biomasa de los puntos de aportación mencionados, es posible el cálculo y representación de la distribución de la biomasa en unidades de densidad superficial y su posterior elaboración de diversos mapas temáticos de la zona de estudio.

### **5.2.3. Optimización de la logística y el transporte**

#### **5.2.3.1. Análisis de la Red de Transporte. Evaluación de tiempos, distancias y costes**

El análisis exhaustivo de la logística debe tener en cuenta diversos factores o restricciones, tanto naturales como artificiales, para evaluar la posibilidad de ubicar la planta de biomasa (ubicaciones potenciales). Para ello es indispensable tener en cuenta los denominados factores de localización.

La localización e identificación de los recursos biomásicos y las ubicaciones potenciales para la instalación de una planta de biomasa necesita de una serie de algoritmos de cálculo de distancias, para consecuentemente calcular los tiempos y costes de transporte asociados a las dos fases del proceso logístico: **recogida y distribución de la biomasa**.

El objetivo es evaluar todas las posibles ubicaciones de la planta de biomasa desde el punto de vista de estos algoritmos de cálculo. Para llevar a cabo este proceso se ha utilizado una herramienta específica incluida en la aplicación cartográfica, susceptible, además, de ser automatizada.

En la zona de actuación (comarca) se parte de la consideración que cualquier punto es válido como posible ubicación de la planta de biomasa (siempre que cumpla con las restricciones sociales y medioambientales), y será analizado en detalle en el proceso de optimización. Siguiendo con la metodología se evalúa y calcula todas las combinaciones posibles entre: las ubicaciones potenciales y todos los puntos de recogida o distribución de biomasa. Se entiende por combinación la ruta o trayectoria existente entre un posible punto de ubicación de la instalación (planta de biomasa) con un punto de aportación o distribución de biomasa.

#### ***5.2.4. Resultados de la valoración de la biomasa disponible y de las mejores ubicaciones para la instalación de plantas de biomasa a nivel comarcal***

Los resultados considerados como más relevantes obtenidos a partir de la aplicación de la metodología descrita, se resumen a continuación brevemente a partir de la información que se encuentra en cada informe comarcal, similar al que se muestra para de la Comarca de Utiel-Requena en la Figura 17. Los datos que se proporcionan son principalmente el potencial biomásico, la demanda energética, las localizaciones potenciales para ubicar plantas de biomasa y los costes de transporte.

La imagen arriba-izquierda muestra un mapa de ubicación de la comarca en el ámbito de la comunidad autónoma en la que está emplazada. Además, incluye algunos datos relevantes de la comarca tales como población, superficies, biomasa forestal y agrícola por especies, etc.

La imagen centro-izquierda representa la biomasa agrícola y forestal mediante una gráfica de columnas para establecer una comparativa en toneladas potenciales. Las columnas coloreadas en naranja corresponden a la biomasa agrícola y las verdes a la biomasa forestal.

La imagen bajo-izquierda representa la demanda energética potencial de biomasa a nivel municipal para cada una de las comarcas. Para el cálculo de estos valores el principal indicador ha sido el número de habitantes por municipio. Los colores más fuertes (marrones oscuros) representan los municipios con un mayor consumo (ktep) que coinciden normalmente con los núcleos de población con mayor densidad de población. Los colores más suaves (amarillos claros) corresponden con los municipios de menor demanda energética.

La imagen arriba-derecha representa gráficamente los resultados obtenidos en la fase de recogida de biomasa y su distribución. Esta figura nos muestra las 10 mejores ubicaciones (5 mejores ubicaciones para la recogida, en color rojo, y 5 mejores ubicaciones para la distribución, en color azul). Los puntos representados en color verde identifican los lugares de aportación de biomasa, tanto agrícola como forestal, es decir,



los lugares hasta donde el camión se ha desplazado y ha recogido la biomasa (previa compactación).

La imagen centro-derecha es una tabla resumen de los principales resultados estadísticos. Éstos han sido calculados para todas las ubicaciones potenciales (en la fase de recogida y distribución) a partir de modelos espaciales mediante GIS, y posteriormente dichos modelos han sido resueltos con la aplicación Desktop- Grid creada para tal fin y la plataforma BOINC (García 2011). En dicho resumen se observan los datos para las 5 mejores ubicaciones representadas (costes de transporte mínimos) y finalmente unos datos globales que tienen en cuenta todos los puntos de aportación de biomasa así como todas las ubicaciones potenciales dentro de la comarca. Uno de los datos más relevante de esta tabla es el coste total, obtenido a partir de la suma del coste de recogida y el coste de distribución de cada una de las ubicaciones potenciales.

La imagen bajo-derecha es la representación de las 5 mejores ubicaciones para la instalación de una planta de biomasa, teniendo en cuenta que la suma del coste de transporte en la fase de recogida y de distribución es el mínimo para estas cinco localizaciones. Los puntos en color gris distribuidos por la comarca son aquellas ubicaciones potenciales que han formado parte del cálculo, es decir, que han sido evaluadas puesto que cumplían las restricciones establecidas para este estudio

Las conclusiones más relevantes de la comarca de Utiel-Requena vienen reflejadas en la Figura 17. Como podemos observar el potencial biomásico es considerablemente elevado, ascendiendo a casi 113.000 t/año, de las cuales 85.000 t son de procedencia agrícola, principalmente de viñedos y frutales, y el resto forestal, básicamente *Pinus halepensis*. En el cuarto cuadrante se ha confeccionado un mapa con la distribución de las cinco mejores ubicaciones tanto para la fase de recogida (puntos rojos) como para la de distribución (puntos azules). Podemos observar como la distribución espacial de éstos se concentra en la zona centro de la comarca, debido principalmente a la buena accesibilidad de esta zona (autovía y carreteras nacionales) y por la localización de los dos núcleos de población más importantes, Utiel y Requena. En la tabla de este mismo cuadrante se resumen los valores representativos del estudio. En primer lugar, los lugares de aportación de biomasa (puntos de recogida) ascienden a 1.760<sup>36</sup> y los lugares candidatos (ubicaciones potenciales) evaluados son 1.028. Los costes totales se encuentran entre 19,8 y 33,2 €/t de biomasa, con una media en la comarca de 24,01 €/t. Finalmente, en el sexto cuadrante se muestra la localización de las mejores ubicaciones de la planta de biomasa considerando tanto la fase de recogida como la de distribución (sus costes) lo que altera con respecto al mapa anterior las ubicaciones finales.

Tanto en la Figura 17 como en las que se incluyen en el Anexo II para cada una de las comarcas estudiadas, el sistema de referencia empleado ha sido el European Datum 1950, proyección UTM (Universal Transverse Mercator) y huso 30 Norte.

---

<sup>36</sup> Estos puntos de recogida de biomasa se comportan como datos de entrada en los modelos de localización del apartado 5.4

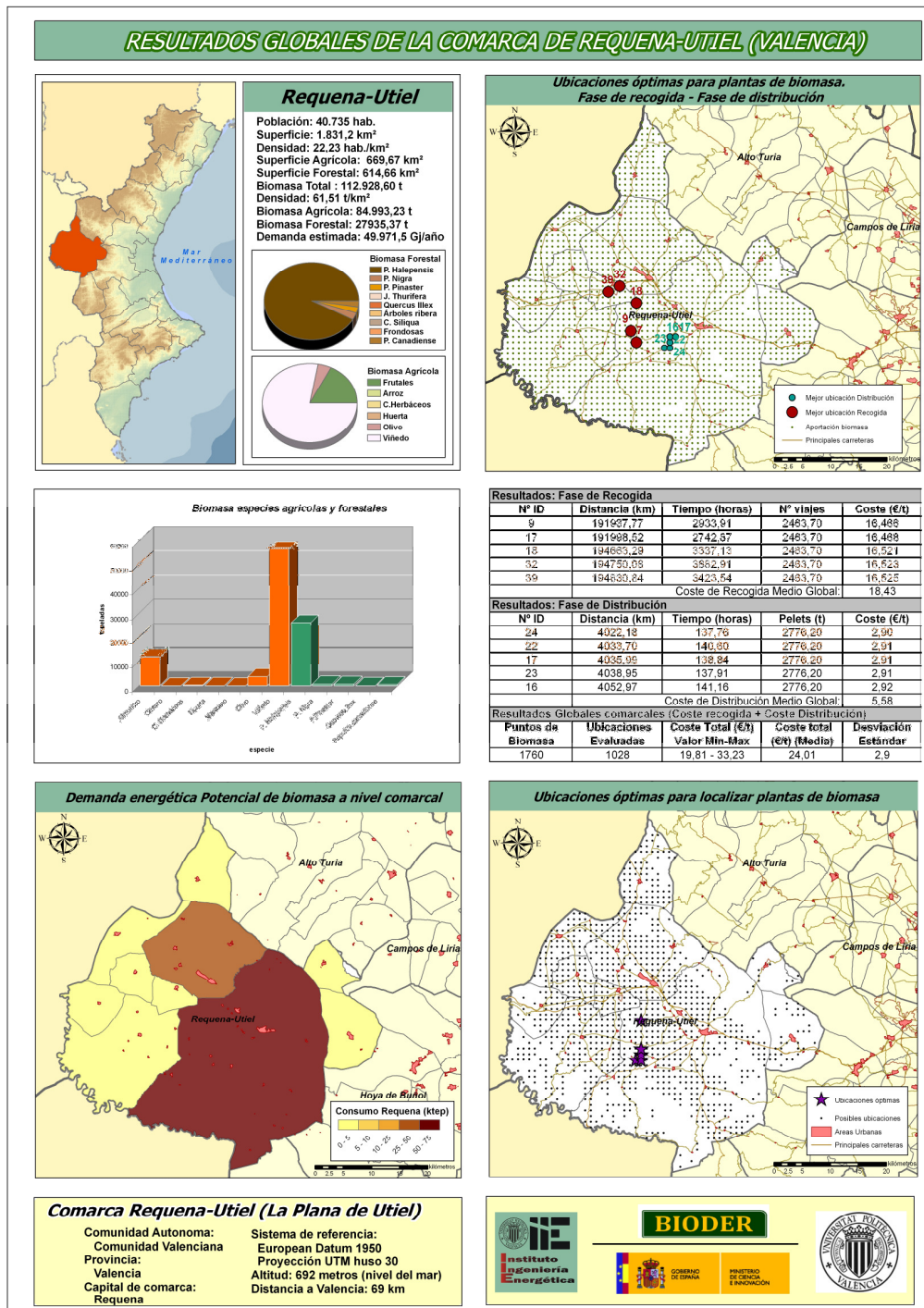


Figura 17. Resultados globales de la Comarca de Utiel-Requena

### **5.3. GRADO DE ADECUACIÓN DE UN TERRITORIO PARA LA UBICACIÓN DE UNA PLANTA DE BIOMASA UTILIZANDO TÉCNICAS DE EMC-SIG**

El problema de localización que se aborda en esta sección está directamente relacionado con la determinación de las áreas más adecuadas para la instalación de una planta de biomasa a escala local, concretamente en la Comarca de Utiel-Requena.

Como vimos en el capítulo 4, el primer paso es plantear e identificar el problema específico para, a continuación, determinar los criterios de evaluación (factores o limitantes) que influyen en la decisión a tomar. En el caso que nos ocupa para la localización de una planta de biomasa, se ven implicados diversos factores y limitantes<sup>37</sup> que aún teniendo un carácter subjetivo, han sido considerados válidos de manera generalizada en la literatura de referencia (Munier 2004; Sule 2001). Resumiendo, la consecuencia de pasos sería la siguiente: 1) establecer los criterios para el cumplimiento del objetivo, 2) determinar los factores y limitantes del estudio, 3) establecer el peso asociado a cada factor (valores de las alternativas), 4) desarrollar reglas de decisión y 5) obtener del mapa de alternativas para el objetivo de estudio y su valoración. En el siguiente capítulo, se realiza el análisis de sensibilidad de las variables que forman parte del proceso multicriterio con el objetivo de comprobar la robustez del modelo planteado.

#### **5.3.1. Establecimiento de los criterios (variables): factores y limitantes**

Normalmente, los criterios más utilizados en la selección de un emplazamiento para una instalación de biomasa, están relacionados con aspectos económicos, sociales, medioambientales y de salubridad y seguridad, debido principalmente a las características de la propia instalación y el impacto más o menos importante que ésta pueda producir.

A continuación, se definen cuales son los criterios y consiguientes factores que el SIG y la base de datos asociada debe incluir para el uso o actividad planteado. Al mismo tiempo se establecerán los limitantes que restringen de forma permanente la disponibilidad del lugar a la hora de evaluar la alternativa para el uso en cuestión. A partir de estos limitantes se generará una capa donde quedarán determinadas las unidades territoriales en las cuales el uso o instalación evaluada está totalmente restringido. Las capas de limitantes son capas binarias en las que el valor 0 representa las áreas limitadas y 1 las que no tienen ningún tipo de limitación para la actividad propuesta.

Todos estos criterios (factores y limitantes) se ven reflejados mediante las correspondientes clases temáticas en el SIG, a partir de la consulta de una extensa bibliografía (Bórdas 2006; Bosque 2002; Conselleria d'obres públiques urbanisme y transport 1998; Gómez 1992; Gómez 2005; Hubina 2008; Munier 2004; Sule 2001; Sumathi 2008; Voivontas 1998), además de la consulta a personal experto y aplicación de las normativas vigentes. A continuación, se muestran los criterios agrupados en tres

---

<sup>37</sup> Los limitantes se representan mediante un mapa de restricciones, y los factores a partir de un mapa de atributos (o mapa temático a partir de capas) (Malczewski 1990).

grupos de factores de nivel superior, siendo: Factores Ambientales y del entorno físico, Factores Económicos y Factores Sociales.

### **Factores Ambientales y del entorno físico**

1. Consideraciones del medio natural y morfología. Se realizará un estudio de la existencia de los siguientes criterios por su alto grado de preservación y de implicación en la construcción de una instalación de estas características en el entorno. Con ello se pretende no perjudicar la caracterización geológica y geomorfológica del área. Se analizan también los riesgos geológicos que pueden agravarse por al ejecución del proyecto o bien que pueden constituir una limitación en la fase de construcción.

*Tipos de cultivos y Cobertura vegetal.* La vegetación en general (calidad, cultivos, áreas forestales, asociaciones naturales, densidad) puede verse afectada por las diferentes fases del proyecto, en la realización de los caminos de acceso, cimentaciones, subestaciones, red eléctrica interior y exterior, etc. Es sabido que la instalación de una nueva actividad, en la mayoría de los casos, lleva implícito el cambio de usos del suelo actual, y por ende supone un coste económico asociado. Por lo que en la medida de lo posible es preciso preservar determinados cultivos y coberturas vegetales frente a dicho uso industrial.

*Litología y Geomorfología.* En este caso se consideran como zonas más adecuadas aquellas sobre las que el tipo de suelo tiene la característica de impermeabilidad en función de la existencia del material argílico y su textura. Este factor evalúa la capacidad portante del suelo, es decir, la capacidad del suelo para soportar pesos debido a la naturaleza, composición, textura y propiedades de las rocas<sup>38</sup>.

*Hidrografía: cursos y masas de agua, línea de costa y áreas inundables.* Es un elemento del medio natural muy vulnerables sobre todo a nivel superficial, en este caso concreto, evitando la contaminación de las aguas o infraestructura relacionada por algún tipo de residuo proveniente de la instalación. La adecuación del territorio será directamente proporcional a la distancia que les separa de cualquier curso de agua o infraestructura relacionada.

2. Consideraciones ambientales y normativa legal. El uso energético de la biomasa dentro de un esquema sostenible de producción del recurso supone una actividad altamente beneficiosa para el medioambiente. Esto ocurre tanto en la fase de producción del recurso como en la fase de transformación energética del mismo. Es importante, y existen normativas al respecto<sup>39</sup>, la preservación y el respeto del medio ambiente, los

---

<sup>38</sup> Existe un documento técnico denominado Sistema Unificado Americano de clasificación textural de suelos, definiendo la relación entre tipos de suelos y su capacidad portante.

<sup>39</sup> Normativa legal. No existe una normativa específica para la instalación de plantas de biomasa. A partir de la Ley 2/2006, de 5 de mayo, de Prevención de la Contaminación y Calidad Ambiental, se enmarcan estas instalaciones en Instalaciones de combustión (Anexo I), a) Instalaciones de producción de energía eléctrica en régimen ordinario o en régimen especial, en las que se produzca la combustión de combustibles fósiles, residuos o biomasa. En la misma ley, en el Anexo II, se detallan un conjunto de instalaciones de la Industria energética, destacando en el 3.6. las Instalaciones en las que exista almacenamiento a la intemperie de combustibles sólido, con capacidad total de la instalación superior a 1.000 toneladas.

espacios naturales de gran valor. La construcción de este tipo de instalaciones conlleva una serie de perjuicios locales a tener en cuenta, por ejemplo, los movimientos de tierras por la realización de nuevos posibles accesos, las operaciones de carga y descarga de los residuos biomásico, las consecuencias paisajísticas, etc.

En todos los casos las regulaciones se centran en las fases posteriores a la selección del emplazamiento, es decir, a las fases de solicitud y de autorización, a las condiciones de explotación de la instalación o al control y calidad de las mismas. El objetivo final de la política de medio ambiente es la protección de la salud del hombre y la conservación, en cantidad y calidad, de todos los recursos que condicionan y sustentan la vida: el aire, el agua, el suelo, el clima, las especies de flora y fauna, el hábitat, las materias primas y el patrimonio cultural y natural (Conselleria de Obras públicas Urbanismo y Transporte 2001; Generalitat Valenciana 1990; 2006; Ministerio de Medio Ambiente 2008) .

*Espacios naturales y áreas protegidas.* La adecuación del territorio será directamente proporcional a la distancia que les separa de estos elementos. Esto es debido a que estos espacios son susceptibles de ser contaminados por algún residuo, además de que legalmente están excluidos para cualquier otro uso.

Lugares de interés y patrimonio histórico, así como vías pecuarias y actividades colectivas tradicionales.

*Emisiones a la atmósfera.* Además de que la legislación regula la contaminación a la atmosfera dependiendo del tipo de instalación, es necesario también tener en cuenta los perjuicios que ocasiona la exhalación de las emisiones además de empeorar la visibilidad paisajística también, y perjudicar el medio ambiente. Una planta de biomasa, según estudios reciente (Alfonso 2009), tiene un balance de CO<sub>2</sub> neutro, y es respetuosa con el medio ambiente. Sin embargo, la carga y descarga mediante camiones y otras maquinarias conllevan unas emisiones negativas que hay que considerar.

*Flora y fauna del entorno.* Se tiene en cuenta las especies de fauna y flora estabilizadas en el área de actuación, con el fin de garantizar la preservación de dichas especies, para no verse afectadas en la alimentación, épocas de apareamiento, crías, campeo, etc.

En general, podemos decir que la normativa que regula este tipo de instalaciones a nivel nacional o autonómico es insuficiente para llevar a cabo un problema de planificación de estas características, puesto que no se especifican de manera explícita los umbrales de los limitantes ni tampoco que factores concretos han de estar presentes. Únicamente es una mera orientación. De hecho, cuando ya se dispone de ciertos lugares candidatos, es de obligado cumplimiento la correspondiente evaluación de impacto ambiental, en las condiciones que se establecen por el *Ley 6/2010, de 24 de marzo, de modificación del texto refundido de la Ley de Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos, aprobado por el Real Decreto Legislativo 1/2008, de 11 de enero.*

---

A nivel Europeo destacamos la directiva 96/61/CE que condiciona la puesta en marcha y funcionamiento de instalaciones industriales orientada a la prevención de la contaminación. Esta se incorporó al ordenamiento interno mediante la Ley 16/2002, de 1 de julio, de Prevención y control integrados. También podemos hacer mención al Acuerdo de 26 de julio de 2001, del gobierno Valenciano por el que se aprueba el Plan Eólico de la Comunidad Valenciana, como instalación energética adoptando las medidas de protección territorial y medioambiental exigibles.

---

### **Factores Económicos**

1. Consideraciones sobre la accesibilidad y la proximidad.

*Accesibilidad a la red vial.* Se trata de uno de los elementos más importantes puesto que es por el cual se producirán los desplazamientos necesarios para que la oferta y la demanda tengan lugar. Se trata de un elemento lineal, por el cual se miden las distancias y se establece la accesibilidad a las carreteras que serán empleadas.

*Recursos biomásicos: agrícolas y forestales.* En el estudio que llevamos a cabo la oferta es la cantidad y caracterización de biomasa, que debe quedar representada mediante un mapa que muestre su distribución espacial, así como la cantidad (en toneladas) de la misma. Como se explica en la metodología del apartado anterior, partimos de elementos poligonales, que son los cultivos agrícolas y las áreas forestales, asociándoles sus correspondientes coeficientes para el cálculo de biomasa.

*Tejido Industrial.* Cuando hablamos de una planta de biomasa con la finalidad de producir energía o pelets, éstas no necesariamente deben emplazarse en polígonos industriales, y además su actividad no es nociva, lo cual amplía el abanico de posibilidades respecto a su ubicación<sup>40</sup>.

*Otras instalaciones molestas o peligrosas.* Este criterio se tiene en cuenta para que no se concentren diversas instalaciones que generan rechazo en la misma área y evitar mayores molestias y perjuicios, incluso entre las propias instalaciones.

*La demanda (población).* La demanda quedará establecida mediante un mapa que muestre la distribución espacial, es decir, aquellos consumidores potenciales de la oferta (biomasa compactada o en pelets). La demanda será localizada por los núcleos de población, en función del número de habitantes, representado por un elemento poligonal, para llevar a cabo medida de distancias (proximidad).

*Pendiente del terreno (MDE) y altitud.* La construcción de estas instalaciones requieren, para minimizar los costes, establecerse en terrenos llanos, con lo que la adecuación del territorio es inversamente proporcional al valor de la pendiente del lugar. Se pretende establecer el acceso por depresiones naturales y poco abruptas, además de evitar zonas erosionables.

*Nivel de desarrollo económico local.* Es importante conocer el grado de desarrollo de la zona y de los sectores de la actividad económica existentes, con el objetivo de garantizar el éxito de la inversión.

*Aeropuertos (proximidad).* Ninguna instalación de las catalogadas como “no deseables” debe estar a menos de una distancia de seguridad respecto a un aeropuerto de viajeros y mercancías, así como de helipuertos. Esta restricción esta relacionada como el hecho de que en este caso las instalaciones industriales desprenden humos a la atmosfera que pudieran dificultar la visión, y por ende, las operaciones de despegue y aterrizaje.

---

<sup>40</sup> Contrariamente, si se tratara de una planta de cogeneración, normalmente se ubican en los polígonos industriales y además la actividad se convierte en nociva, de modo que éstos no podrían ser limitantes.

2. Consideraciones respecto a la disponibilidad y usos del suelo. Se considera el uso actual del suelo como una de las influencias más fuertes para la localización de actividades con el fin de determinar con precisión las medidas protectoras y/o correctoras a aplicar para conseguir una buena integración una vez concluida la fase de construcción. Los factores considerados son:

*Superficie de ocupación necesaria.* La construcción de una planta de biomasa necesita que exista una superficie de terreno lo suficientemente amplia para albergar dicha instalación, requiriendo una superficie mínima de 5 h.

*Regulación de los usos del suelo.* Las zonas urbanas, industriales y similares no son edificables nuevamente, al igual que los lagos y los embalses. A partir de la cartografía de calificación y clasificación del suelo vigente de la Comunidad Valenciana de la Consellería de Medi Ambient, aigua, urbanisme y habitatge y del Planeamiento Urbanístico en la Comunidad Valenciana (Conselleria d'obres públiques urbanisme y transport 1999), se clasifica por un lado, en suelo urbano, urbanizable y no urbanizable, y por otro respecto a la calificación se contempla los usos globales: residencial, Industrial, Terciario, Protegido, Dotacional, Dominio público, Común. En concreto, a partir de la legislación vigente, para la localización de una instalación energética es necesario que el suelo sea No Urbanizable Común.

### **Factores Sociales**

Los factores que más se repite son los relacionados con la afección a la población, siendo estos:

*Distancia a la población afectada.* Para el caso de instalaciones semi-deseables y no deseables, este es un punto a tener en cuenta. Para ello debemos mostrar un mapa que refleje las poblaciones que se verán afectadas por la localización de una planta. Conocido el dato de la densidad de población para cada municipio, además de establecer unas distancias a cada una de las áreas urbanas de cada municipio, llegamos a valorar las poblaciones más afectadas. Una de las principales causas se inicia de en la propia fase de construcción de la planta, y posteriormente con el tratamiento y traslado de la biomasa, así como el mantenimiento de camiones, que conlleva un malestar en forma de contaminación acústica que debe ser considerado.

*Impacto visual.* La construcción de este tipo de instalaciones, a pesar de que su tamaño no implica una gran ocupación de suelo, conlleva un rechazo por parte de los afectados más cercanos por el empobrecimiento paisajístico del lugar como consecuencia de la visibilidad en el entorno. Esto es debido a la disminución de la calidad paisajística de las áreas directamente afectadas así como el fondo escénico, y en ocasiones el desconocimiento por parte de los residentes sobre el perjuicio que conlleva la instalación, se produce un rechazo a este tipo de proyectos.

A continuación, se muestra en la Tabla 14 un resumen de los criterios empleados para el análisis, así como algunas de sus características para el problema de decisión.

<b>CRITERIOS</b>	<b>TIPO</b>	<b>ÁREA DE SEGURIDAD</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
Recursos biomásicos	Factor	-	Distribución espacial de la biomasa en la comarca (en t/ha) a partir de la cartografía de cultivos y áreas forestales. Factor dividido en 4 clases.
Litología	Factor	-	Clasificación litológica para la determinación de la capacidad litológica para uso industrial. Factor dividido en 8 clases.
Tipos de cultivos	Factor	-	Clasificación de los tipos de cultivos agrícolas con la finalidad de preservar determinados frente a dicho uso industrial. Factor dividido en 5 clases
Cobertura Vegetal natural	Factor	-	Clasificación de los tipos de cobertura vegetal con la finalidad de preservar determinados frente a dicho uso industrial. Factor dividido en 4 clases.
Accesibilidad Vial	Factor	-	Identificación de tres zonas de accesibilidad en función de la proximidad a los distintos tipos de vías (lineal), por el que se miden las distancias. Factor dividido en 3 clases.
Fisiografía	Factor	-	Determinación de las características morfológicas de las laderas por el riesgo de deslizamientos e inestabilidad del terreno. Factor dividido en 5 clases.
Desarrollo económico	Factor	-	Determinación del grado de desarrollo económico local, teniendo en cuenta el tejido industrial existente, población y superficie municipal. Factor dividido en 3 clases.
Demanda Potencial	Factor	-	Determinación de la demanda potencial a nivel municipal en función del consumo energético local y la biomasa disponible en la comarca. Factor dividido en 3 clases.
Población afectada	Factor	-	Determinación de las poblaciones más afectadas teniendo en cuenta la densidad de población y la distancia a los núcleos respecto de la instalación. Factor dividido en 5 clases
Coste de transporte	Factor	-	Determinación del coste de transporte de las labores de recocida y distribución de la biomasa. Factor dividido en 4 clases
Geomorfología	Factor	-	Identificación de áreas susceptibles a la erosión, inundabilidad y estabilidad de taludes. Factor dividido en 6 clases
Impacto Visual	Factor	-	Determinación de las áreas donde la visibilidad de dicha instalación es nula a partir de cuencas visuales. Factor dividido en 2 clases
Regulación de los	Limitante	-	Las instalaciones energéticas



usos del suelo			únicamente pueden ser instaladas en suelo No Urbanizable común.
Pendiente	Limitante	-	Pendientes superiores a 15% no está permitida la ubicación de este tipo de instalaciones
Núcleos de población	Limitante	600 metros	La proximidad a los núcleos de población requieren una franja de seguridad entorno al elemento
Tejido industrial	Limitante	200 metros	La proximidad a los polígonos industriales requieren una franja de seguridad entorno al elemento
Red hidrográfica y masas de agua	Limitante	500 metros	La proximidad a los cauces fluviales así como lagos, lagunas, embalses, etc., requieren una franja de seguridad entorno al elemento
Vías de comunicación	Limitante	100 metros	Para garantizar la seguridad en los desplazamientos por carretera, se establece una franja de protección entorno al elemento
Patrimonio histórico	Limitante	200 metros	Monumentos y yacimientos arqueológicos requieren un anillo de protección
Espacios naturales	Limitante	500 metros	Parques naturales y espacios protegido requieren un anillo de protección
Flora y fauna	Limitante	500 metros	Monumentos y yacimientos arqueológicos requieren un anillo de protección
Áreas inundables	Limitante	300 metros	Para garantizar la seguridad de la planta frente a inundaciones requieren una franja de protección entorno al elemento
Aeropuertos y helipuertos	Limitante	500 metros	Para garantizar la seguridad en el tráfico aéreo, se establece una franja de protección entorno al elemento
Ferrocarril	Limitante	100 metros	Para garantizar la seguridad, se establece una franja de protección entorno al elemento
Vías pecuarias	Limitante	200 metros	Para la preservación de este tipo de vías se establece una franja de protección entorno al elemento
Otras Instalaciones e infraestructuras	Limitante	100 metros	Depósito de combustibles y de agua, torres de Alta tensión, gasolineras, acueducto, tuberías, presa, extracción minera, almacenamiento de residuos y transformadores eléctricos

**Tabla 14. Factores y limitantes considerados para ubicar una planta de biomasa**

Las fuentes de información cartográficas se han obtenido de organismos oficiales nacionales y pueden consultarse en el capítulo 1 apartado 1.5. Del mismo modo que en apartados anteriores, el sistema de referencia empleado ha sido el European Datum 1950, proyección UTM (Universal Transverse Mercator) y el huso 30 Norte.

**5.3.2. Desarrollo de las matrices de comparación por pares, cálculo de los pesos de los criterios y ratios de consistencia**

Para la obtención de las matrices de comparación por pares se ha empleado una de las aplicaciones más ampliamente utilizadas en el campo de la evaluación multicriterio, el conocido Expert Choice (Expert Choice 2009; <http://www.expertchoice.com/> 2009). La finalidad reside en conocer los pesos finales de cada factor en cada una de las jerarquías y obtener el ratio de consistencia de las matrices, indicándonos la coherencia aritmética en la asignación de los valores en cada matriz.

Ya hemos comentado, que una vez definidos el conjunto de factores en forma de capas, se deben establecer los valores de las categorías de cada factor en primer lugar, y posteriormente, deben ser ponderados para así establecer jerarquías relativas de importancia entre los factores utilizando en este caso el método de las Jerarquías Analíticas. Para llevar a cabo este proceso de asignación de los pesos a los factores utilizando el método de comparación por pares debemos seguir los siguientes pasos:

- Sumar los valores de cada columna de la matriz de comparación.
- Dividir cada elemento de la matriz por el valor total de la columna a la que pertenece para normalizar los valores de la matriz (correspondería al procedimiento 3 descrito en el apartado 4.3.).
- Calcular la media de los elementos en cada fila de la matriz normalizada (dividir la suma total de la fila por el número de factores empleados), obteniendo así el eigenvector principal normalizado (que correspondería con el valor de cada alternativa).
- Por último, se calcula la razón o ratio de consistencia (CR) para determinar la consistencia en los juicios de valor planteados, es decir, la coherencia aritmética en la asignación de los valores de la matriz. La consistencia perfecta se alcanzaría con CR=0.

$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{Ec. 33}$$

donde,  $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$ , siendo  $\lambda$  un valor que se obtiene del producto del eigenvector principal normalizado por la matriz de comparación, y siendo n el número de factores (o clases) en la matriz de comparación. Denominados RI al índice aleatorio de una matriz recíproca y diagonal =1 estando comprendido entre los valores  $1,59 > RI > 0$  según muestra la Tabla 15.

n	RI	n	RI	n	RI
1	0,00	6	1,24	11	1,51
2	0,00	7	1,32	12	1,48
3	0,58	8	1,41	13	1,56
4	0,90	9	1,45	14	1,57
5	1,12	10	1,49	15	1,59

**Tabla 15. Valores del RI para la obtención del Ratio de Consistencia según el número de criterios. Fuente: Malczewski (1990)**

Este método utiliza una escala de valores comprendida entre 1 y 9 (véase apartado 4.4.1.3.) comparando dos factores mediante un juicio de valor. En la práctica se trata de completar todas las celdas de la matriz (aij) mediante estos valores y sus recíprocos tal y como veremos a continuación basándonos en la Tabla 16.

<b>IMPORTANCIA (JUICIO DE PREFERENCIA)</b>	<b>VALOR</b>
Igual importancia	1
Igual a moderada importancia	2
Moderada importancia	3
Moderada a fuerte importancia	4
Fuerte importancia	5
Fuerte a muy fuerte importancia	6
Muy fuerte importancia	7
Muy fuerte a extremadamente fuerte	8
Extremadamente fuerte	9

**Tabla 16. Escala en el método de comparación por pares, Malzcewski (1999)**

### 1. FACTORES

Todas las matrices de comparación por pares son referidas al uso o actividad que estamos tratando, en este caso una instalación de biomasa. A continuación, se muestran las matrices de comparación del primer nivel en la Tabla 18 y segundo nivel de jerarquías en la Tabla 19 (las mencionadas anteriormente) agrupadas según la literatura revisada en: factores ambientales y físicos, factores económicos y factores sociales, ponderados en este mismo orden. El  $w_{ij}$  global normalizado se obtiene del producto del peso de los factores del nivel 1 por el peso de los factores del nivel 2 (los trece criterios empleados) dependiendo del grupo en el que se encuentren.

<b>FACTORES NIVEL 1</b>				
Clases	1	2	3	$w_{ij}$
1	1	2	5	<b>0,58</b>
2	1/2	1	3	<b>0,30</b>
3	1/5	1/5	1	<b>0,12</b>

**Tabla 17. Matriz de comparación por pares de los factores del primer nivel.  
Ratio de consistencia: 0,001**

FACTORES NIVEL1	FACTORES NIVEL 2	w <sub>ij</sub> global
<b>1. Factores ambientales y físicos del entorno</b>	Litología	<b>0,074</b>
	Tipos de cultivos	<b>0,150</b>
	Cobertura vegetal	<b>0,150</b>
	Fisiografía	<b>0,124</b>
	Geomorfología	<b>0,100</b>
<b>2. Factores económicos</b>	Pendiente del terreno	<b>0,075</b>
	Accesibilidad a la red	<b>0,038</b>
	Desarrollo Económico local	<b>0,041</b>
	Biomasa	<b>0,072</b>
	Coste de Transporte	<b>0,086</b>
	Demanda Potencial	<b>0,057</b>
<b>3. Factores sociales</b>	Población afectada	<b>0,024</b>
	Impacto Visual	<b>0,009</b>

**Tabla 18. Análisis de adecuación de la comarca de Utiel-Requena para la localización de una planta de biomasa**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	w <sub>ij</sub>
1	1	2	1	1	2	2	1	1	1	1	1	2	3	<b>0,098</b>
2	1/2	1	1/2	1/2	2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1	2	<b>0,050</b>
3	1	2	1	1	2	1	1	2	2	2	1	1	3	<b>0,102</b>
4	1	2	1	1	2	2	1	2	1	1	1	2	3	<b>0,102</b>
5	1/2	1/2	1/2	1/2	1	1/2	1/2	1	1	1/2	1/2	1	2	<b>0,050</b>
6	1/2	2	1	1/2	2	1	1	2	2	1	1/2	1	3	<b>0,084</b>
7	1	2	1	1	2	1	1	2	1	1	1	2	3	<b>0,095</b>
8	1	2	1/2	1/2	1	1/2	1/2	1	1/2	1/2	1/2	1/2	2	<b>0,054</b>
9	1	2	1/2	1	1	1/2	1	2	1	1	1/2	1	3	<b>0,075</b>
10	1	2	1/2	1	2	1	1	2	1	1	1/2	1	2	<b>0,080</b>
11	1	2	1	1	2	2	1	2	2	2	1	2	3	<b>0,113</b>
12	1/2	1	1	1/2	1	1	1/2	2	1	1	1/2	1	3	<b>0,068</b>
13	1/3	1/2	1/3	1/3	1/2	1/3	1/3	1/2	1/3	1/2	1/3	1/3	1	<b>0,029</b>

**Tabla 19. Matriz de comparación por pares de los criterios (factores del nivel 2) asignados para la adecuación del territorio frente a una instalación de biomasa. Ratio de consistencia: 0,02**

donde,

1-Pendiente del terreno, 2-Litología, 3-Tipos de Cultivos, 4-Cobertura Vegetal  
5-Accesibilidad red vial, 6-Fisiografía, 7-Biomasa, 8-Desarrollo económico, 9-Demanda Potencial, 10-Población afectada, 11-Coste de transporte, 12-Geomorfología y 13- Impacto visual

Las matrices de comparación establecidas para el segundo nivel de jerarquías fueron: pendiente del terreno, litología, tipos de cultivos, cobertura vegetal, accesibilidad a la red vial, fisiografía, recurso biomásico, desarrollo económico local, demanda potencial, coste de transporte, la geomorfología y el impacto visual. Estas se listan en el Anexo III.

## 2. LIMITANTES

- Ley 11/1994, de 27 de diciembre, de la Generalitat Valenciana. Ley de espacios naturales protegidos de la Comunidad Valenciana. (DOGV, número 2423, de 9 de enero de 1995). Esta ley recoge una catalogación de los diferentes espacios naturales existentes en la Comunidad Valenciana, realizando una agrupación de los mismos en:

- Parques, reservas y parajes naturales
- Monumentos naturales.
- Sitios de interés.
- Paisajes protegidos
- Flora y fauna

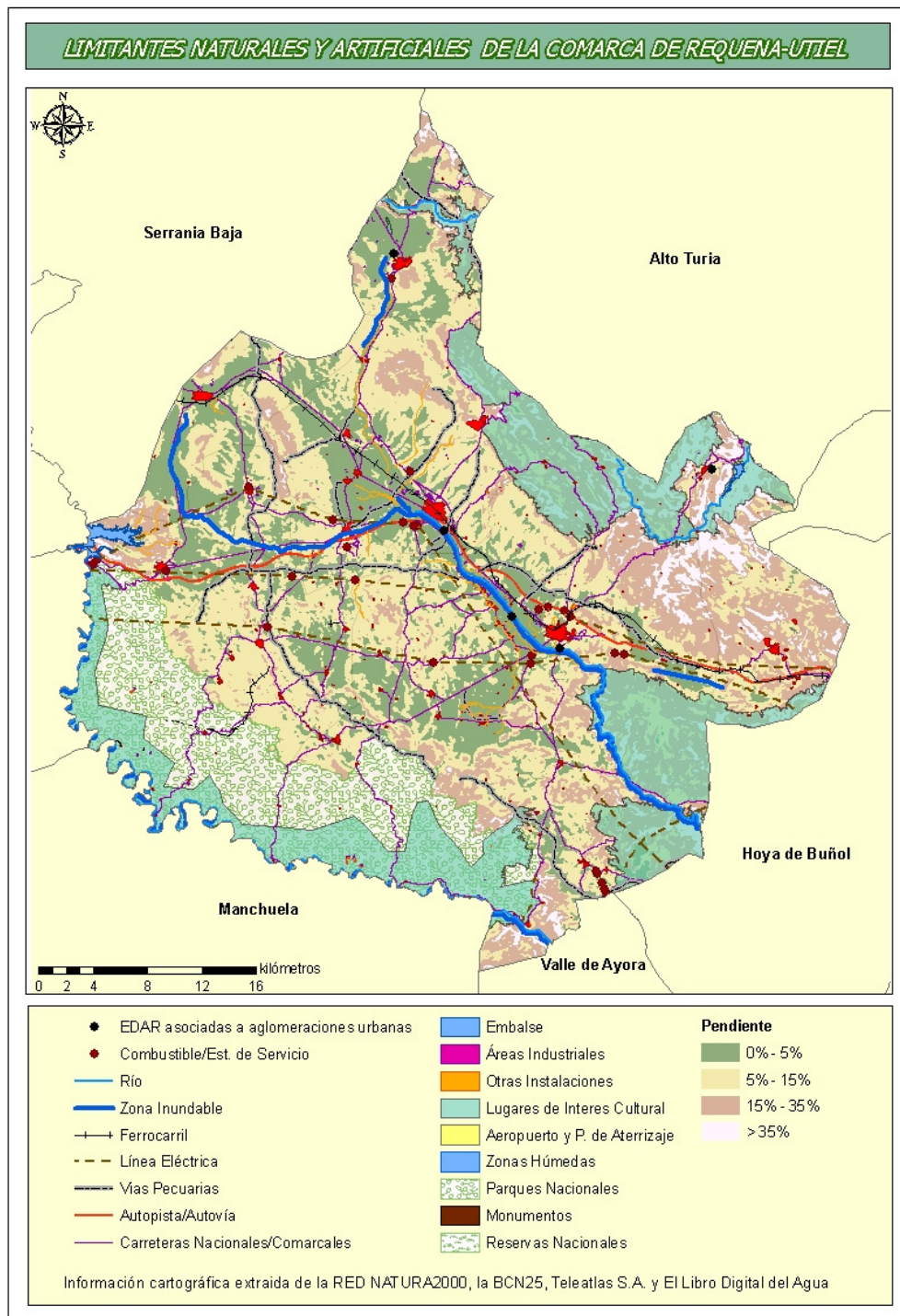
Cabe destacar que la porción del territorio incluida en este tipo de espacios protegidos, constituyen por sí misma una unidad de síntesis homogénea y que imposibilita el desarrollo de otro tipo de actividades o usos del territorio, dada la legislación actual vigente. Además de esta, nos encontramos en materia de patrimonio histórico con:

- Ley 16/1985, de 25 de junio. Ley de patrimonio histórico español. (BOE, número 155, de 29 de junio de 1985). Integran el Patrimonio Histórico Español los inmuebles y objetos de interés artístico, histórico, paleontológico, arqueológico, etnográfico, científico o técnico. También forman parte del mismo los yacimientos y zonas arqueológicas, sitios naturales, jardines y parques, que tengan valor artístico o histórico.

LIMITANTES	VALOR
Pendiente	<15%
Núcleos de población	600 metros
Tejido industrial	200 metros
Red hidrográfica y masas de agua	500 metros
Vías de comunicación	100 metros
Patrimonio histórico	200 metros
Espacios naturales	500 metros
Flora y fauna	500 metros
Áreas inundables	300 metros
Aeropuertos y helipuertos	500 metros
Ferrocarril	100 metros
Vías pecuarias	200 metros
Otras Instalaciones e infraestructuras	100 metros

**Tabla 20. Limitantes considerados para la localización de la planta de biomasa**

Tanto los espacios naturales protegidos como el patrimonio Histórico constituirán, por sí mismos, parte de la zonificación del territorio en la que se determinará un uso conservativo de los mismos, de aquellas regiones del territorio que presentan características especiales que así lo aconsejan. Por ello, estos elementos han de clasificarse como irremplazables y adoptar una política conservativa sobre ellos. En la parte práctica se establecerá una zona de influencia para proteger estos espacios y monumentos impidiendo construir en dichas zonas.



**Figura 18. Limitantes naturales y artificiales de la Comarca de Utiel-Requena**

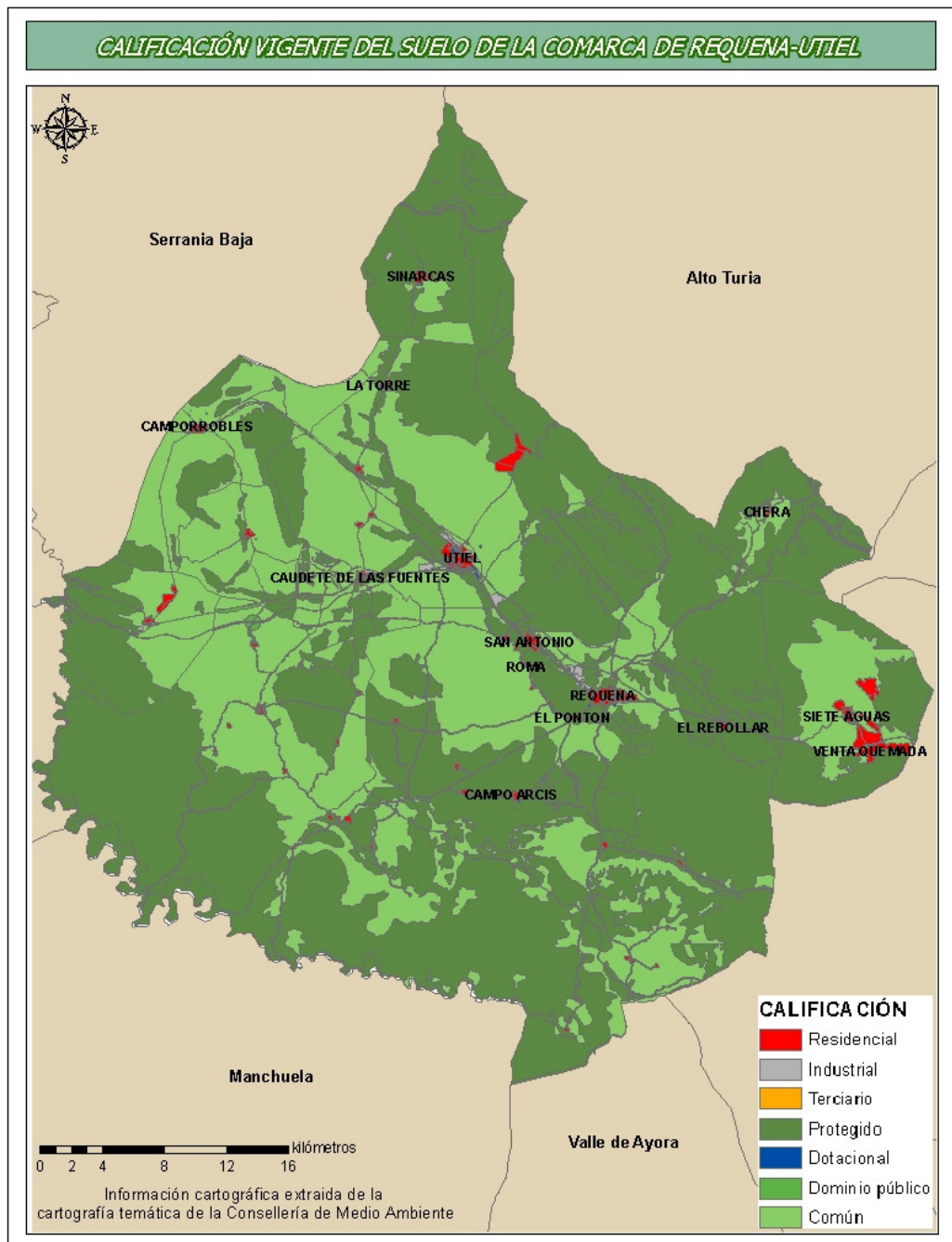


Figura 19. Calificación del suelo de la Comarca de Utiel-Requena. Fuente: Consellería de Medio Ambiente

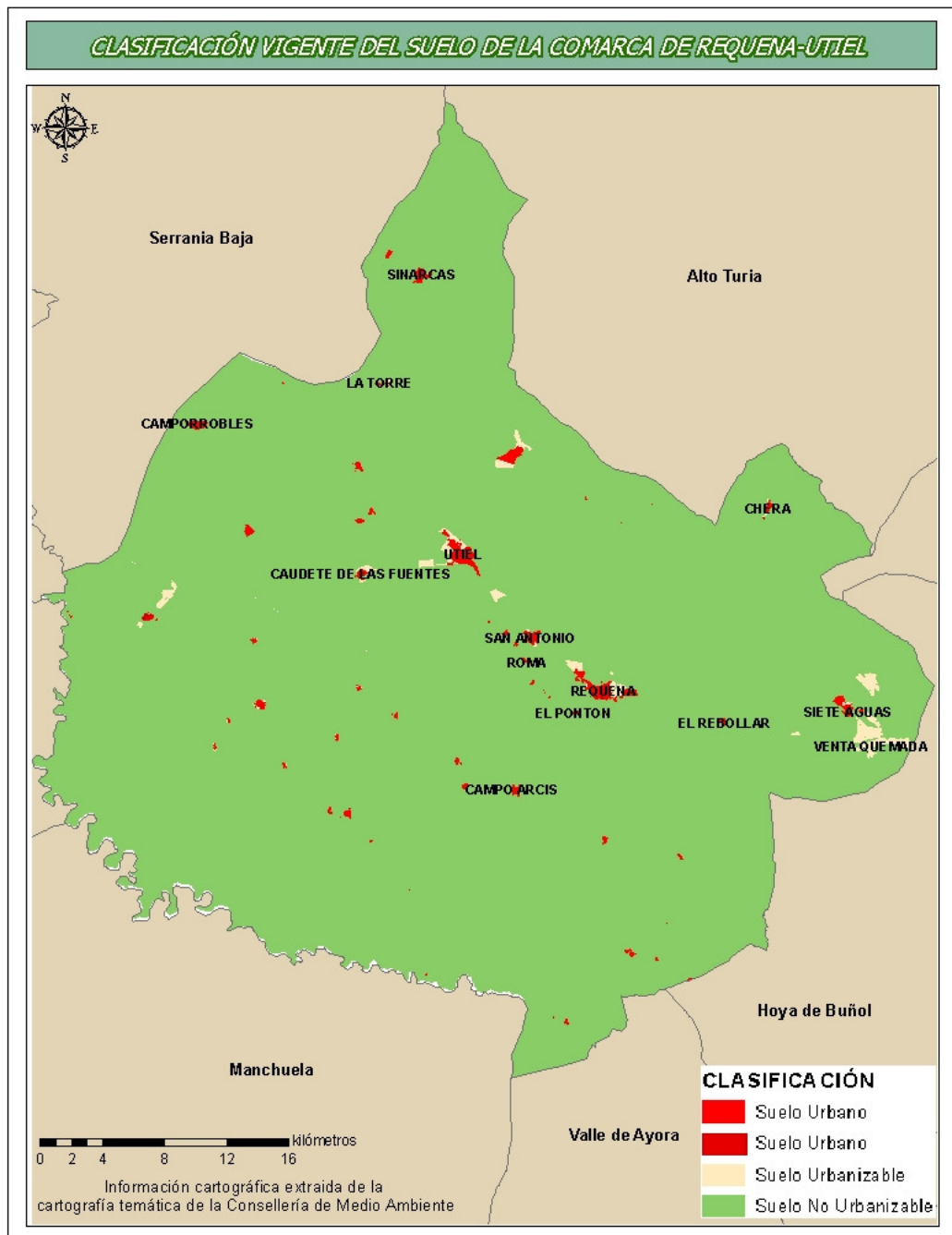


Figura 20. Calificación del suelo de la Comarca de Utiel-Requena. Fuente: Consellería de Medio Ambiente



### 5.3.3. *Establecimiento de las reglas de decisión*

Un paso previo antes de aplicar una regla de decisión (la técnica de EMC escogida) cuando nos encontramos en entorno SIG es la superposición de la información cartográfica para integrar todos los factores en una capa resultante y conocer de manera cuantitativa la valoración de cada alternativa. Este proceso se puede entender como una sumatoria de las fronteras espaciales de los datos en el caso de entidades poligonales, obteniendo así un conjunto de polígonos (las alternativas) con atributos homogéneos, provenientes de los atributos de las capas establecidos previamente a partir de los factores estudiado.

Una vez realizada la superposición, y en nuestro caso concreto la regla de decisión elegida debe corresponder al tipo de problema “objetivo simple y criterios múltiples”, en nuestro caso concreto la sumatoria lineal y el análisis del punto ideal, con el objetivo de comparar los resultados y observar como se comportan los datos mediante la aplicación de uno u otro. Cada uno de los métodos está basado en un procedimiento distinto ya que mientras el método de la Sumatoria lineal pertenece al grupo de métodos aditivos, el método del análisis del punto ideal pertenece a aquéllos que utilizan el punto ideal, aún siendo ambos métodos compensatorios.

Resumiendo el proceso para la obtención de la adecuación del territorio para albergar una planta de biomasa, una vez definidos los pesos de los criterios y valoradas las categorías de cada criterio, sería el siguiente.

- Asignar a cada criterio los valores establecidos  $Valor_{ij}$  en cada clase con el objetivo de determinar todos los factores. Para ello en cada factor se crean dos campos: VALOR y PESO, los cuales se rellenan con los valores numéricos calculados en las matrices de comparación.
- Se lleva a cabo la superposición de los criterios considerados en cada caso y se les aplica la ponderación, según sean factores medioambientales, económicos o sociales.
- Aplicar a la capa de alternativas resultante de la superposición, los factores restrictivos (los limitantes) a dicha actividad. Esta operación reduce considerablemente las alternativas (los lugares) donde no podrá ubicarse una planta de biomasa.

#### **Aplicación de la regla de decisión**

Los resultados de la Sumatoria Lineal ponderada los obtenemos aplicando directamente la ecuación siguiente en la base de datos del GIS, calculando la evaluación global de cada alternativa. Esta será el resultado de multiplicar el valor de cada criterio por su peso:

$$r_i = \sum_{j=1}^n w_j v_j \quad \text{Ec. 34}$$

donde

$r_i$  es el nivel de adecuación de la alternativa  $i$

$w_j$  es el peso del criterio  $j$ , donde  $\sum_{j=1}^n w_j = 1$

$v_j$  es el valor ponderado de la alternativa  $i$  en el criterio  $j$

Los resultados del Método del Punto Ideal se calculan a partir de la ecuación X.

$$D_p = \left[ \sum_{j=1}^n w_j |v_{ij} - v_j^*|^p \right]^{1/p} \quad \text{Ec. 35}$$

donde,

$D_p$  es la distancia entre cada alternativa y el punto ideal

$w_j$  es el peso asignado al criterio  $j$ . El  $\sum_{j=1}^n w_j$  debe ser igual a 1

$v_{ij}$  es el valor de la alternativa  $i$  en el criterio  $j$  normalizado

$v_j^*$  es el valor del punto ideal para el criterio  $j$ , cuya valor es 1

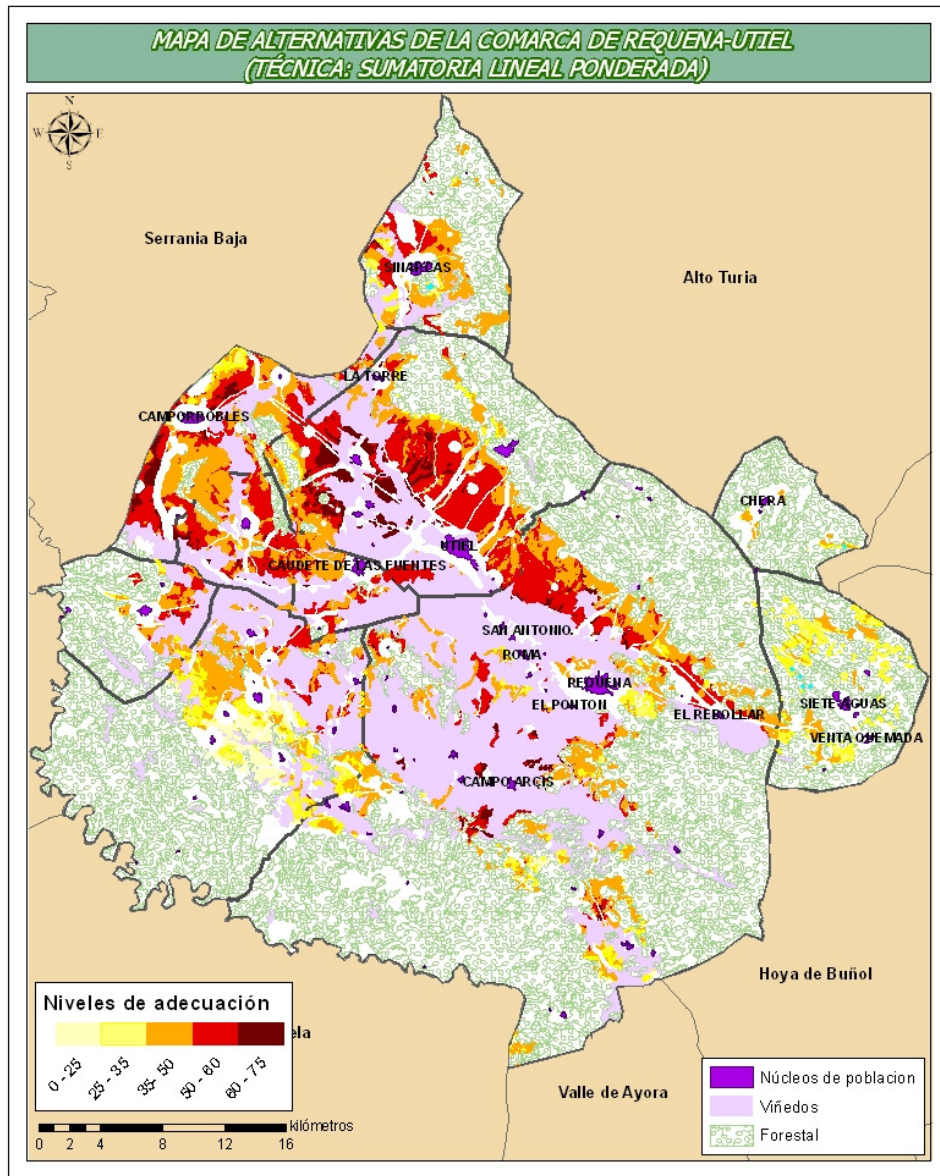
$p$  es la métrica de la distancia, siendo  $p=2$  para la distancia euclídea

#### 5.3.4. *Obtención del mapa de alternativas para el objeto del estudio*

La aplicación de las técnicas de EMC vistas en el apartado anterior evalúa cada alternativa de modo que se establece una valoración cuantitativa para cada una de ellas, donde los valores más altos representan las zonas con mayor capacidad para la actividad evaluada. El resultado de este procedimiento será un mapa temático donde se mostrarán las alternativas de forma gradual para albergar una instalación de bioenergía, desde las áreas menos adecuadas hasta las más adecuadas. En la figura 22 se muestran las zonas aptas después de la aplicación de la técnica de la Sumatoria Lineal Ponderadas, discriminando entre las áreas más adecuadas en color rojo y con los valores más altos<sup>41</sup> cercanos a 100, mientras que los valores amarillos son las menos adecuadas y le corresponden los valores más bajos. Del mismo modo en la Figura 22, las zonas rojas representan las áreas más adecuadas y las amarillas las menos adecuadas, estableciéndose en este caso valores entre 0-1 siendo los valores cercanos a 0 los mejores, puesto que representan una menor distancia al “punto ideal”.

---

<sup>41</sup> (el valor 100 sería la alternativa perfecta, puesto que la sumatoria lineal ponderada establece valores entre 0 - 100)



**Figura 21. Adecuación de la comarca de Utiel-Requena para la instalación de una planta de biomasa utilizando la Sumatoria Lineal Ponderada**

Respecto a los resultados cuantitativos a partir del método de la sumatoria lineal ponderada destacamos que de la totalidad de la superficie de la comarca de aproximadamente 1.835 km<sup>2</sup>, únicamente 418 km<sup>2</sup> del rango completo de adecuación son susceptibles de albergar una planta de biomasa, cumpliendo estos terrenos con los limitantes descritos en el apartado anterior. En la siguiente tabla vemos la superficie que le corresponde según los intervalos establecidos, siendo los que ocupa mayor extensión

las zonas intermedias de adecuación, es decir, entre 35 y 60 puntos. Solo 28,1 km<sup>2</sup> corresponde a zonas altamente adecuadas para la instalación de la planta.

SUPERFICIE DE LOS NIVELES DE ADECUACIÓN		
Entre 0 - 25	Menos adecuadas ↓ Mas adecuadas	9,8 km <sup>2</sup>
Entre 25- 35		44,5 km <sup>2</sup>
Entre 35 - 50		181,6 km <sup>2</sup>
Entre 50 - 60		154,4 km <sup>2</sup>
Entre 60 - 75		28,1 km <sup>2</sup>

**Tabla 21. Superficies susceptibles para albergar una planta según su nivel de adecuación**

De la figura 22 se desprende que las áreas más adecuadas (áreas coloreadas en marrón oscuro) se encuentran fundamentalmente al noroeste de Utiel, en los terrenos colindantes a los núcleos de población de Las Cuevas, Las Casas y Los Corrales. También existen un porcentaje de terrenos de alta adecuación en las cercanías al núcleo urbano de Camporrobles, y un último grupo más disperso en la zona centro de la comarca, en la zona norte de los núcleos urbanos de San Antonio y Requena y en las inmediaciones de campo Arcís.

Como se observa en la tabla 21 las zonas menos adecuadas (entre 0 y 25, coloreadas en amarillo claro) se sitúan en la zona sudoeste de la comarca, en las cercanías de las localidades de Venta del Moro y Casa de Moya. Del mismo modo el siguiente nivel de adecuación (entre 25 y 35, coloreadas en amarillo intenso) se concentra principalmente en la zona este de la comarca, en las áreas colindantes a los núcleos urbanos de Siete Aguas, además de un agrupamiento al sur de la localidad de Requena, al norte de Camporrobles y áreas intercaladas en la zona sudoeste con el nivel anterior.

Por último, podemos observar los 336 km<sup>2</sup> de la suma de los niveles intermedios (coloreados en naranja y rojo) ofreciendo un amplio abanico de ubicaciones por extenderse de forma homogénea por toda la superficie susceptible de albergar una planta de biomasa. Se destaca una franja extensa en estos niveles en la zona norte de las localidades más importantes, Requena, Utiel y Caudete de las Fuentes, limitando ésta con la masa forestal situada al norte de la comarca.

El mismo análisis cuantitativo y cualitativo podemos llevar a cabo sobre los resultados obtenidos a partir del método del punto ideal. En la tabla 22 se muestra la superficie disponible dependiendo del nivel de adecuación.

SUPERFICIE DE LOS NIVELES DE ADECUACIÓN		
Entre 2,4 – 2,9	Menos adecuadas ↓ Mas adecuadas	27,2 km <sup>2</sup>
Entre 2,0 – 2,4		78,7 km <sup>2</sup>
Entre 1,6 – 2,0		196,8 km <sup>2</sup>
Entre 1,3 – 1,6		95,5 km <sup>2</sup>
Entre 0 – 1,3		20,4 km <sup>2</sup>

**Tabla 22. Superficies susceptibles para albergar una planta según su nivel de adecuación**

En relación con Figura 22 podemos afirmar que los resultados son considerablemente semejantes, lo que era de esperar, puesto que aunque se utilizan distintos métodos de EMC el resultado ha de ser el mismo, siempre y cuando no se cambien los valores y los pesos de cada factor y clase. Únicamente podemos ver que en los intervalos de adecuación intermedios (entre 1,3 y 2,4) ha habido un descenso de la superficie de uno de ellos, favoreciendo al otro.

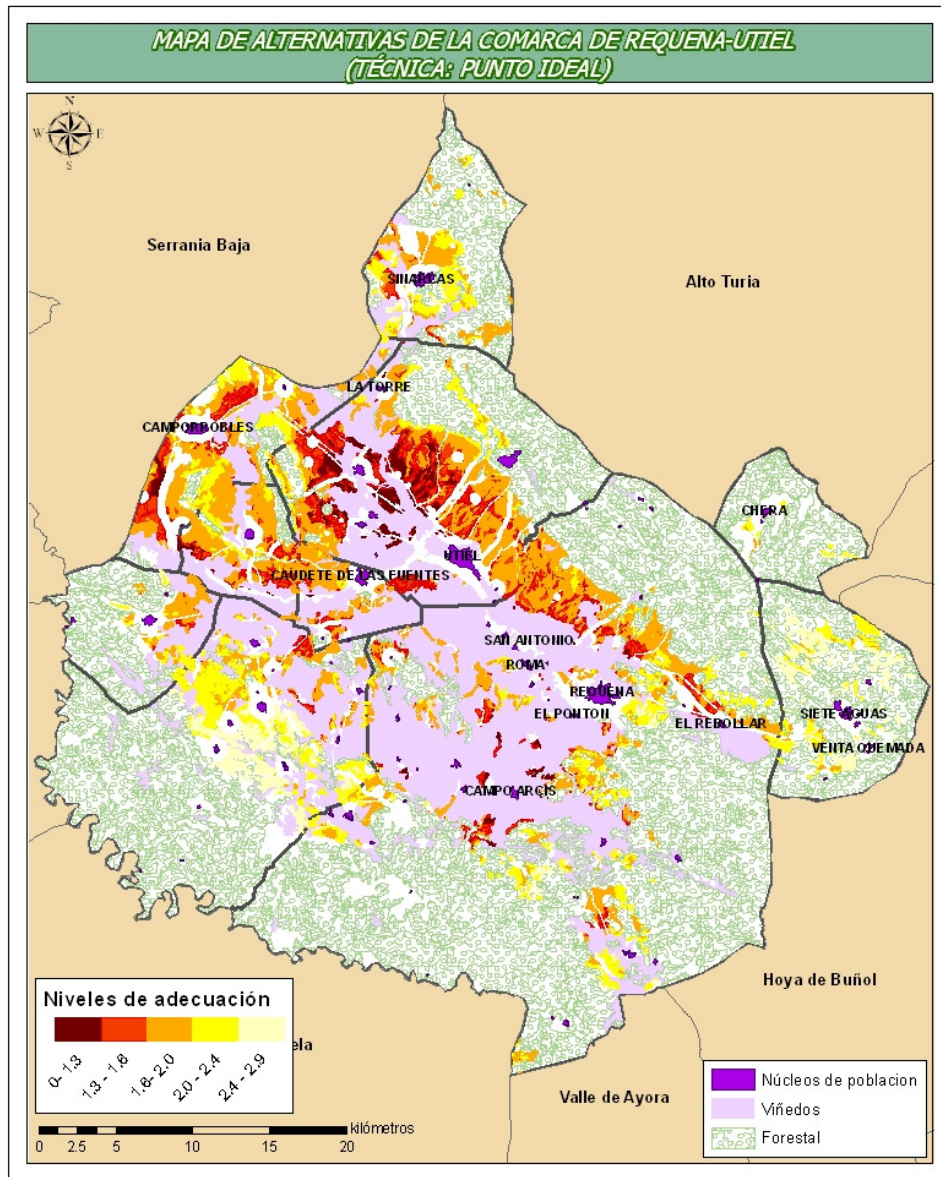


Figura 22. Adecuación de la comarca de Utiel-Requena para la instalación de una planta de biomasa utilizando el método del Punto Ideal

La Tabla 23 muestra las valoraciones cualitativas cada factor empleado en el análisis seleccionando de la totalidad de alternativas únicamente las cinco mejores y peores alternativas, tal y como se han clasificado en sus respectivas matrices de comparación por pares. Pasamos a clarificar esta tabla.

En la primera columna se identifican los trece factores que se han empleado en la evaluación multicriterio. La segunda columna lista cada clase en las que se encuentra dividida cada uno de los factores. En la tercera y cuarta columna se realiza la valoración cuantitativa de las cinco mejores y peores alternativas del siguiente modo. La zona sombreada en gris de la tercera columna es la clase idónea dentro de cada factor para albergar la planta de biomasa, contrariamente a lo que ocurre en la cuarta columna de peores alternativas representada por la zona sombreada de color verde oscuro. Por ejemplo, en el caso de la litología, aquella que tendrá el mayor valor será la clase 7: Arcillas plásticas, margas y yesíferas, y, las peores puntuaciones serán para la clase 1: Calizas. Siguiendo con el ejemplo de litología, las cinco primeras alternativas coinciden con la clase establecida como idónea y por ello cada una de ellas está marcada con una cruz, y por tanto tienen las mayores puntuaciones en la base de datos del SIG. Del mismo modo, cuatro de las cinco peores alternativas, tienen las peores puntuaciones puesto que coinciden con la clase menos puntuada representadas por una cruz, excepto una de ellas que tiene la puntuación de la clase dolomías, siendo ésta igualmente baja. Esta clarificación se aplica a cada factor y para cada clase y de este modo vemos que las cinco mejores alternativas seleccionadas de los resultados coinciden prácticamente con las zonas sombreadas en gris, lo que significa que han obtenido las mejores valoraciones. Del mismo modo pero al contrario ocurre para las peores alternativas.

FACTORES	ATRIBUTO	MEJORES					PEORES				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Litología	1- Calizas						X	X	X	X	X
	2 -Dolomías						X				
	3- Margas y calizas										
	4-Cuarcitas										
	5 -Areniscas compactas										
	6- Arcillas arenosas y areniscas arcillosas										
	7- Arcillas plásticas, margas y yesíferas	X	X	X	X	X					
	8- Alternancia de arcillas, margas, areniscas y calizas										
Cobertura vegetal	1- Frondosas y coníferas						X	X	X	X	X
	2- Otros estratos boscosos										
	3- Estrato Arbustivo y boscoso										
	4- Resto de vegetación natural	X	X	X	X	X					
Tipos de cultivos	1- Regadío						X	X	X	X	X
	2- Árboles frutales										
	3- Viñedo										
	4- Mosaicos de cultivos	X	X	X	X	X					
	5- Secano y labor	X	X	X	X	X					

Fisiografía	1- Z. planas sin ondulaciones	X	X	X	X	X					
	2- Ondulación suave-moderada										
	3- Fuertemente ondulado										
	4- Laderas moderadas-acentuadas										
	5- Zonas abruptas						X	X	X	X	X
Geomorfología	1- Sin riesgo, erosión muy baja	X	X	X	X	X					
	2- Sin riesgo y erosión baja										
	3- Sin riesgo, erosión moderada						X	X	X	X	X
	4- Riesgo de deslizamiento bajo y erosión muy baja										
	5- Riesgo de deslizamiento bajo y erosión baja										
	6- Riesgo de deslizamiento bajo y erosión moderada										
Pendiente del terreno	1- Pendiente 0%-5%	X	X	X	X	X					
	2- Pendiente 5%-10%										
	3- Pendiente 10%-15%						X	X	X	X	X
	4- Pendiente 15%-35%										
Accesibilidad a la red	1- Accesibilidad Alta										
	2- Accesibilidad Media			X	X		X				
	3- Accesibilidad Baja	X	X			X	X	X	X	X	X
Desarrollo Económico	1-Indicador entre 0 - 1						X	X	X	X	X
	2-Indicador entre 1 - 6										
	3-Indicador entre 6 - 15	X	X	X	X	X					
Biomasa	1-Bioma entre 0-50 t						X	X	X		X
	2- Biomasa 100-200 t									X	
	3- Biomasa 200 - 300 t										
	4- Biomasa mayor 300 t	X	X	X	X	X					
Coste de Transporte	1- 19 – 23 euros/tonelada	X	X	X	X	X					
	2- 23 – 26 euros/tonelada										
	3- 26 – 29 euros/tonelada							X			X
	4- 29 – 34 euros/tonelada						X	X	X	X	X
Demanda Potencial	1- Demanda Alta										
	2- Demanda Media	X	X	X	X	X					
	3- Demanda Baja						X	X	X	X	X
Población afectada	1-Población no afectada						X	X			
	2- Poblac. muy poco afectada	X	X	X			X				
	3- Población poco afectada										X
	4- Población afectada				X	X				X	
	5-Poblac.fuertemente afectada										
Impacto Visual	1- Visible		X		X	X					
	2- No visible	X		X			X	X	X	X	X

Tabla 23. Selección y comparativa de las cinco mejores y peores valoraciones

### 5.3.5. *Análisis de sensibilidad de la EMC*

Como vimos en el capítulo 4, apartado 4.6, los dos elementos más importantes a considerar en un análisis de sensibilidad son los pesos de los criterios y los valores de los atributos, teniendo incluso más relevancia los primeros. Esto es debido a que los pesos de los criterios son la esencia de los juicios de valor por parte del decisor y se establecen como números subjetivos, y en el caso de la valoración la problemática se da cuando hay un número pequeño de datos o por el propio juicio de valor del analista. En la práctica, los valores de los atributos que encierran un elevado grado de incertidumbre y subjetividad en su estimación deben ser investigados en relación al aspecto conceptual del modelo, para determinar el efecto de su variación en la clasificación de las alternativas.

Es por estos motivos la gran transcendencia de llevar a cabo un análisis de sensibilidad de los factores que se han considerado en nuestro estudio para la localización de plantas de biomasa. Existen diferentes métodos y muy variados para realizar este análisis, pero de la bibliografía revisada se desprende que los métodos globales para la EMC en entornos SIG enmarcados en problemas de localización y optimización son los más adecuados. En concreto, el método FAST y el Sobol', ambos basados en la varianza<sup>42</sup>, son los más empleados en este campo, aunque no siempre con variables espaciales, permitiéndonos evaluar todos los elementos de un modelo de manera simultánea.

Para la realización del análisis de incertidumbre y de sensibilidad ha sido utilizado el programa SIMLAB V2.2 (SIMLAB 2004), desarrollado por el Joint Research Center de la Comisión Europea., el cual emplea el método de Monte Carlo para determinar la incertidumbre en las predicciones del modelo y las variables de entrada que dieron lugar a esa incertidumbre, a partir de una muestra de los factores de entrada. En general, un análisis de Monte Carlo consiste en cinco pasos, divididos en tres módulos en el programa, los cuales realizan las siguientes funciones:

- Módulo Statistical Pre Processor: Selección de los factores y determinación de su distribución. Posteriormente, esta selección se utilizará para generar la muestra aplicando uno de los métodos ofrecidos por el programa.
- Módulo Model Execution: Se configura el modelo que se alimenta de la muestra del paso anterior. Su ejecución a partir del análisis de Monte Carlo produce el conjunto de resultados de la evaluación del modelo que serán la base del análisis de incertidumbre y sensibilidad.
- Módulo Statistical Post Processor: El análisis de incertidumbre se puede realizar a partir de estadísticos básicos como la media y la varianza, o mediante otros que proporciona el programa. Finalmente, el análisis de sensibilidad se nutre de los resultados de las evaluaciones del paso anterior.

El objetivo de este análisis es averiguar como influyen las variaciones, introducidas en los factores y pesos que componen el modelo presentado en el apartado anterior, en los

---

<sup>42</sup> La varianza en estos métodos actúa como un indicador de la importancia de los factores del modelo respecto a la variación de los resultados del mismo. A partir de ésta se calculan los índices de sensibilidad de primer orden y el índice de sensibilidad total.



resultados del mismo. Ello proporcionará una mayor fiabilidad a los resultados y determinará cuales son los factores cuya repercusión en el modelo es insignificante.

En este análisis vamos a emplear los métodos Sobol' y Fast extendido. La ventaja del método Fast frente al Sobol' es que el índice de sensibilidad de primer orden e índice total pueden ser calculados agrupando los pesos y los criterios en grupos definidos en el modelo (criterios económicos, ambientales y sociales), con lo que es posible calcular la influencia de cada grupo en los resultados. Mediante estos métodos seremos capaces de discernir entre las incertidumbres debidas a los criterios y las de los pesos otorgados a éstos al mismo tiempo.

**5.3.5.1. Distribución de los factores y extracción de la muestra**

Como ya hemos apuntado, el procedimiento para llevar a cabo el análisis de sensibilidad parte de determinar la distribución de los factores que hemos empleado en la EMC, y mediante ellos generar la muestra. Este paso es de vital importancia en el conjunto del proceso, puesto que la distribución de las muestras ha de reflejar de la manera más fidedigna posible la distribución original. Las siguientes figuras representan la distribución correspondiente de los 13 factores implicados en el estudio y acompañados por su media y desviación típica en cada caso, como muestra la Tabla 24, serán las variables del modelo sujetas a incertidumbre y cuyo efecto en los resultados se desea estudiar.

CRITERIO	TIPO	DISTRIBUCION	$\mu$	$\sigma$
Pendiente	Continua	uniforme	0,20	0,17
Litología	Discreta	Discreta	0,10	0,12
Tipos de Cultivos	Discreta	Discreta	0,18	0,13
Cobertura Vegetal	Discreta	Discreta	0,24	0,15
Accesibilidad red vial	Discreta	Discreta	0,65	0,15
Fisiografía	Discreta	Discreta	0,12	0,11
Biomasa	Continua	Uniforme	0,23	0,19
Desarrollo económico	Discreta	Discreta	0,17	0,16
Demanda Potencial	Discreta	Discreta	0,13	0,19
Población afectada	Discreta	Discreta	0,24	0,14
Coste de transporte	Continua	Uniforme	0,77	0,08
Geomorfología	Discreta	Discreta	0,19	0,10
Impacto visual	Discreta	Discreta	0,57	0,18

**Tabla 24. Características de los criterios implicados en el análisis**

La representación gráfica de cada una de las distribuciones puede consultarse en el Anexo IV.

En el caso de los pesos, que también van a ser evaluados en este análisis, se ha utilizado una distribución uniforme con variaciones del  $\pm 25\%$ ,  $\pm 50\%$  y  $\pm 75\%$  del valor original. Esto implica realizar la ejecución del modelo por cada uno de estos porcentajes para comprobar la incidencia de cada grupo en los resultados.

La generación de la muestra de las variables seleccionadas puede ser expresada de la siguiente manera:

$$x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}] \quad i = 1, 2, \dots, n$$

siendo  $n$  el tamaño de la muestra y  $k$  el número de variables.

Otro de los aspectos más importantes a la hora de llevar a cabo estos análisis es el método de muestreo utilizado para obtener la distribución de cada variable. El programa ofrece diversos métodos para este fin, eligiendo en nuestro caso en primera instancia el método Sobol', y en segundo lugar el método Fast extendido estableciendo los tres grupos de nuestro análisis.

### 5.3.5.2. Configuración del modelo

Una vez obtenidas las muestras, el siguiente paso consistirá en determinar el modelo y ejecutarlo para cada una de ellas. El modelo planteado es el de la sumatoria lineal ponderada cuya formulación matemática viene representada por la expresión:

$$\text{modelo} = \sum_{i=1}^n v_i * w_i \quad i = 1, \dots, n \quad \text{siendo } n = 13 \quad \text{Ec. 36}$$

donde  $w_i$  representan los pesos asociados a cada factor  $i$ , siendo  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ , y

$v_i$  representa el valor de cada factor  $i$ .

### 5.3.5.3. Resultados: análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad proporciona información sobre los trece factores y cuales son los principales responsables de las variaciones en los resultados del modelo. Los índices de sensibilidad de primer orden tienen una interpretación natural, ya que representan la fracción de la variación de la producción total que se debe a un factor individual. Los resultados gráficos y numéricos que nos proporciona el programa se representan en los apartados siguientes en forma de gráfico de tartas, según el tipo de análisis y método. El gráfico de tarta representa la varianza total y cada fracción representa el índice Sobol' o Fast de cada criterio implicado en el modelo.

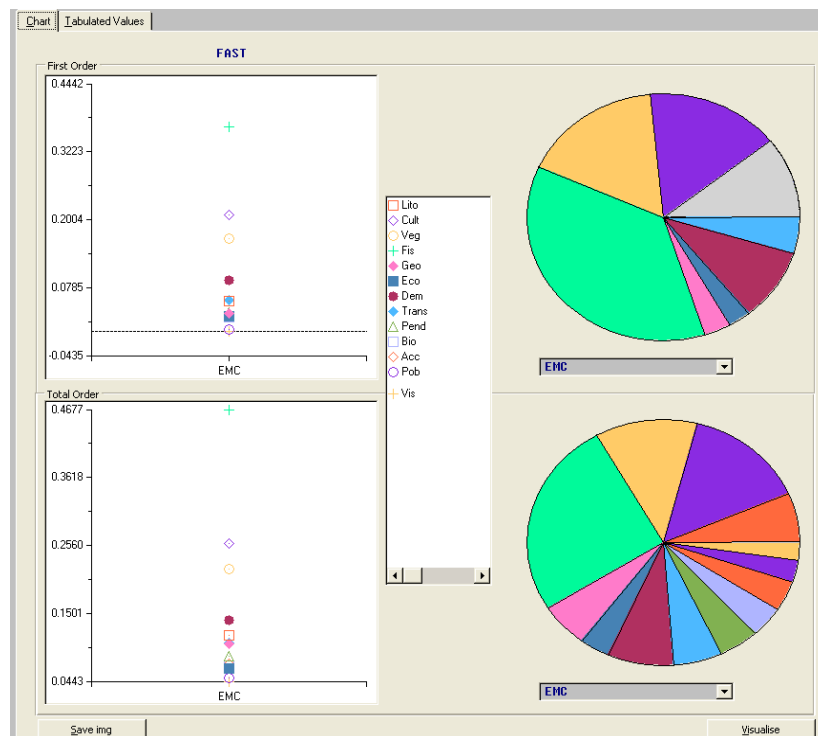
Una vez generadas las muestras y ejecutado el modelo mediante el análisis de Monte Carlo, se obtienen los índices de sensibilidad de primer orden ( $S_i$ ) y los índices de sensibilidad totales ( $S_{Ti}$ ) para los componentes del modelo, es decir, para cada uno de los criterios y los pesos.

**Método E-Fast. Índices de Sensibilidad de primer orden y totales**

En este primer análisis no se van a tener en cuenta los pesos asignados a cada criterio, es decir, no se evalúa la influencia de las variaciones introducidas por los pesos que componen el modelo, en los resultados del mismo. La finalidad será la de determinar cuales son los factores cuya repercusión en el modelo es relevante. A continuación, la Figura 23 y la Tabla 25 muestran los resultados obtenidos por el programa. De los resultados se vislumbra, tanto de los índices de sensibilidad de primer orden como de los totales, que la variación de tres de los factores es la que esta contribuyendo decisivamente en la variación de los resultados del modelo, siendo estos: la fisiografía (0,36), los tipos de cultivos (0,20) y la vegetación (0,16).

CRITERIO	S <sub>i</sub>	S <sub>Ti</sub>
Fisiografía	0,3672	0,4676
Cultivo	0,2096	0,2608
Vegetación	0,1680	0,2202
Demanda	0,0933	0,1409
Coste transporte	0,0576	0,1053
Litología	0,0550	0,1173

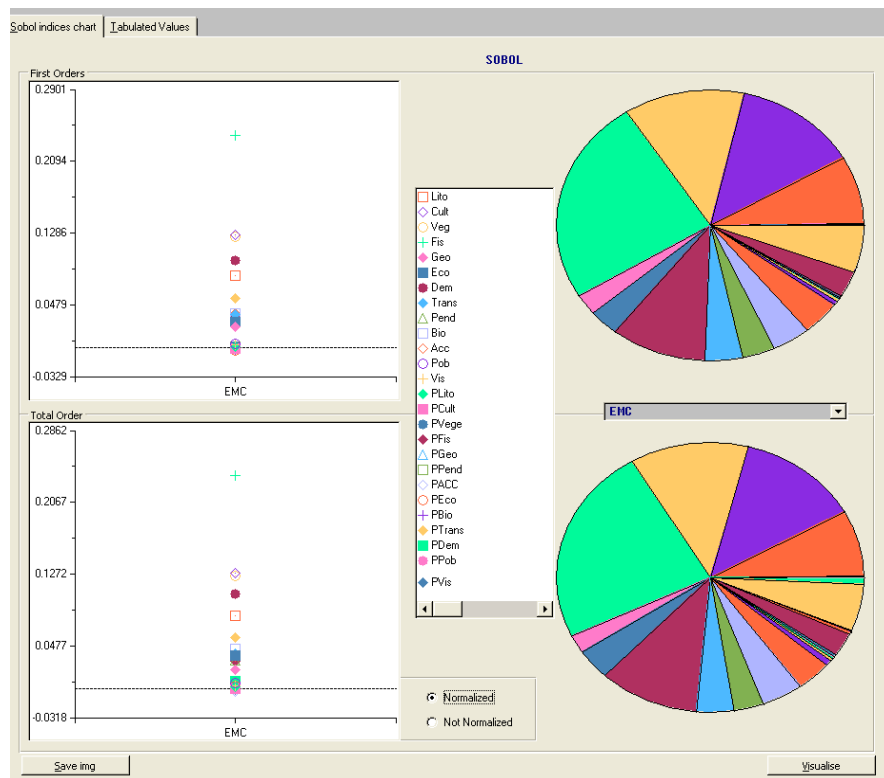
**Tabla 25. Resultados numérico más relevantes a partir del método E-Fast (constantes)**



**Figura 23. Resultados del análisis de sensibilidad a partir del método Fast extendido sin variaciones en los pesos (constantes)**

**Método Sobol'. Índices de Sensibilidad de primer orden y totales**

La siguiente Figura 24 y la Tabla 26 representan los resultados obtenidos aplicando el método Sobol' con variación en los pesos, con la finalidad de comprobar la contribución de éstos al modelo.



**Figura 24. Resultados del análisis de sensibilidad a partir del método Sobol'**

Analizando los resultados obtenidos se desprende que tanto en los índices de sensibilidad de primer orden como en los totales son, de nuevo, tres los criterios que están contribuyendo de manera importante en el resultado del modelo, en un primer grupo: fisiografía, tipos de cultivos y vegetación, seguidos muy de cerca por un segundo grupo: demanda potencial y litología. El primer grupo explica más del 49% de la variación de los resultados, seguidos de un grupo intermedio que explicaría el 43%, y finalmente el resto que explicaría menos del 8%.

La variación de los pesos de  $\pm 25\%$ ,  $\pm 50\%$  y  $\pm 75\%$  de sus valores originales revela la importancia de varios pesos empleados en el análisis, como es el caso del peso del transporte, de la vegetación y de la fisiografía que aparecen con una importancia destacable en la variación del  $\pm 50\%$  en segundo lugar, superando incluso la contribución en los resultados respecto a otros criterios. Observamos que en la variación del  $\pm 50\%$  el peso del transporte ha igualado al primer criterio, fisiografía, y el peso de la vegetación y de la fisiografía han incrementado considerablemente su valor superando a

los criterios demanda y litología. En la variación del  $\pm 75\%$  el peso del transporte y de la vegetación toman los valores más altos, decreciendo la aportación del resto de criterios en los resultados del modelo. Esta variación nos indica que los pesos de estos tres factores son altamente sensibles y por lo tanto muy influyentes en el modelo. La insignificante diferencia entre los índices de primer orden y los totales (las diferencias entre  $S_i$  y  $S_{Ti}$  son muy pequeñas) indica la escasa interacción entre los distintos criterios del modelo.

CRITERIO	VARIACIÓN DE LOS PESOS					
	$\pm 25\%$		$\pm 50\%$		$\pm 75\%$	
	$S_i$	$S_{Ti}$	$S_i$	$S_{Ti}$	$S_i$	$S_{Ti}$
Fisiografía	0,2394	0,2367	0,1330	0,1357	0,0854	0,0925
Cultivo	0,1271	0,1285	0,0985	0,1272	0,0500	0,0903
Vegetación	0,1253	0,1259	0,1048	0,1164	0,0648	0,0806
Demanda	0,0989	0,1052	0,0542	0,0575	0,0365	0,0382
Peso transporte	0,0557	0,0569	0,1330	0,1358	0,1930	0,1980
Peso Vegetación	0,0024	0,0030	0,0923	0,1040	0,1353	0,1512
Peso Fisiografía	0,0341	0,0313	0,0672	0,698	0,9304	0,1001
Litología	0,0813	0,0814	0,0512	0,0520	0,0362	0,0348

Tabla 26. Resultados numéricos más relevantes del análisis a partir del método Sobol'

#### **Método E-FAST. Agrupación de pesos y de criterios en tres categorías**

El método E-FAST con agrupación de pesos y criterios nos permite conocer los índices de sensibilidad de primer orden y totales en los tres grandes grupos definidos en el planteamiento de la EMC: factores ambientales, factores económicos y factores sociales, y de esta manera comprobar la influencia de cada grupo en los resultados.

Para llevar a cabo el análisis de sensibilidad se han dividido todos los factores en seis grupos, quedando separados los pesos de los criterios. Esta agrupación se realiza en el momento de seleccionar el tipo de método para generar la muestra siendo el modelo de ejecución exactamente el mismo (sumatoria lineal ponderada). Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 25 y Tabla 27 siguientes.

Observando los datos de la Tabla 27 y la Figura 25 se comprueba una destacable diferencia entre los seis grupos propuestos, destacando en primer lugar el grupo de los factores ambientales, con un índice de 0,59, seguido por el grupo de factores económicos con 0,24. Debido a los pesos otorgados a cada criterio, este resultado era de esperar, es decir, en ambos grupos se encuentran los factores más influyentes, como la fisiografía, tipos de cultivos y vegetación en el primer caso, y la pendiente, coste de transporte y biomasa, en el segundo. Destacamos la diferencia tan considerable entre estos dos grupos con respecto al resto, estando en el último lugar los pesos sociales. Finalmente, comparando los índices de primer orden con los totales se observan diferencias considerables en algunos grupos, por ejemplo en el económico, lo que nos indica que esta interactuando con los distintos grupos del modelo.

CRITERIO	VARIACIÓN DE LOS PESOS					
	±25%		±50%		±75%	
	S <sub>i</sub>	S <sub>Ti</sub>	S <sub>i</sub>	S <sub>Ti</sub>	S <sub>i</sub>	S <sub>Ti</sub>
Ambientales	0,5943	0,6855	0,3563	0,4424	0,2213	0,3036
Económicos	0,2423	0,4437	0,1684	0,2513	0,1558	0,2293
Sociales	0,0107	0,0874	0,0068	0,0601	0,0064	0,0563
Pesos ambientales	0,0365	0,1221	0,2104	0,3202	0,2444	0,3321
Pesos Económicos	0,0776	0,1614	0,2340	0,2932	0,2019	0,2738
Pesos Sociales	0,0054	0,0806	0,0075	0,0674	0,0085	0,0067

Tabla 27. Resultados numéricos del análisis a partir del método E-FAST agrupado

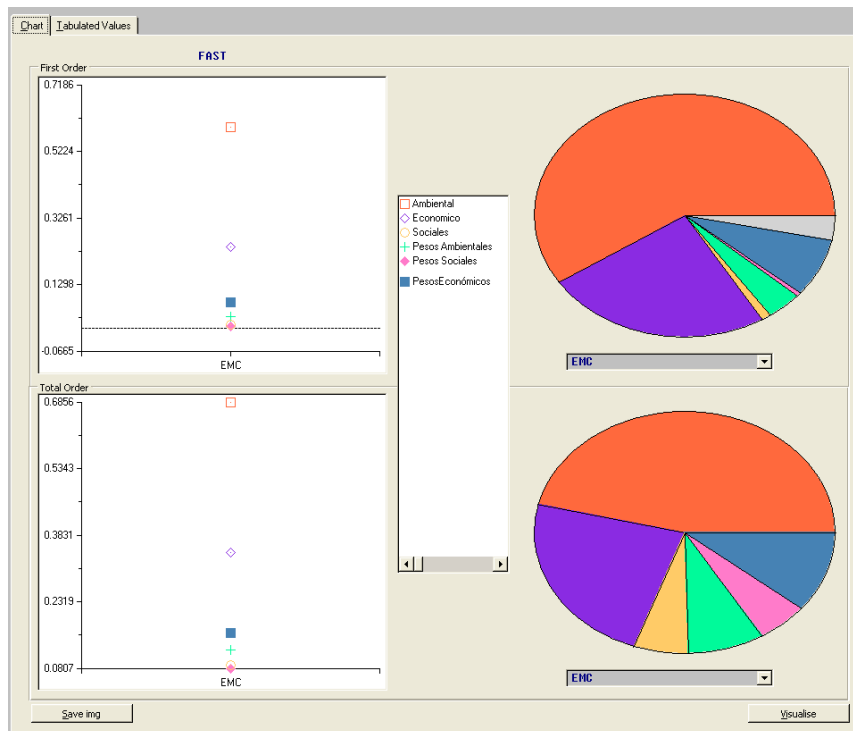


Figura 25. Resultados del análisis de sensibilidad a partir del método E-FAST agrupado

**Método Morris. Preselección de criterios**

La importante utilidad del método Morris se pone de relieve cuando el número de factores es muy elevado (más de 100 factores) y hace inviable computacionalmente la resolución a partir de métodos globales. A pesar de que no es el caso que nos ocupa, se ha considerado relevante analizar los resultados a partir de este método. El método Morris representa una aproximación en el conocimiento de la incertidumbre de los

resultados, clasificando cualitativamente los factores de entrada según la importancia relativa. Este método actúa como un pre-análisis para determinar los factores más influyentes en el modelo a partir de dos medidas de sensibilidad para cada factor:  $\mu$  como medida de efecto global de cada factor (eje de abscisas), y  $\sigma$  como la suma del efecto cada factor interaccionado con el resto (eje de ordenadas). Los resultados gráficos y estadísticos podemos verlos en la Figura 26 y Tabla 28.

El principal objetivo de la aplicación de este método es clasificar por orden de importancia cada factor e identificar el subconjunto de los más importantes, sabiendo que  $\mu$  es el valor más informativo y que a mayor  $\mu$  más importante es el factor. En nuestro caso, el primer grupo de factores influyentes lo forman: cultivos, fisiografía, vegetación, seguidos a continuación por litología y demanda

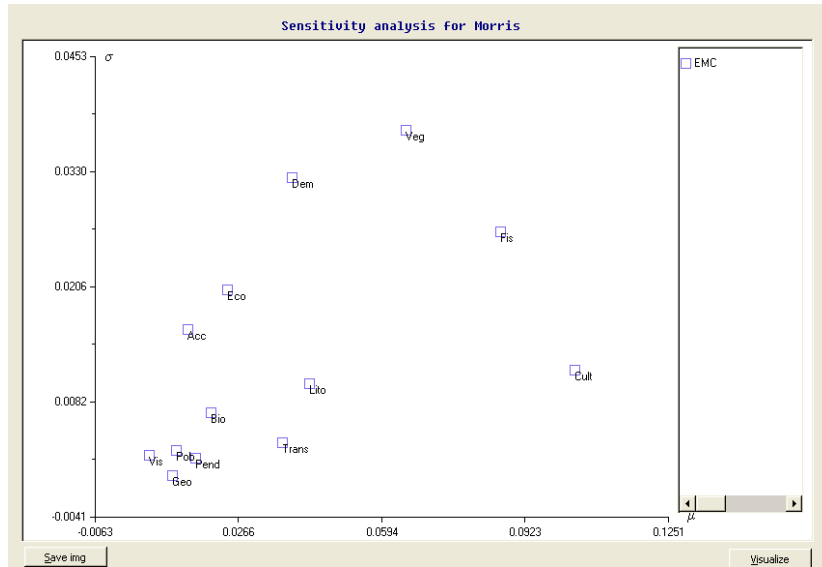


Figura 26. Resultados del análisis de sensibilidad a partir del método Morris

CRITERIO	$\mu$	$\sigma$
Tipos de Cultivos	0,103	0,011
Fisiografía	0,086	0,026
Cobertura Vegetal	0,065	0,037
Litología	0,043	0,010
Demanda Potencial	0,039	0,032
Coste de transporte	0,036	0,004
Desarrollo económico	0,024	0,020
Biomasa	0,020	0,007
Pendiente	0,017	0,002
Accesibilidad red vial	0,015	0,016
Población afectada	0,012	0,003
Geomorfología	0,011	0,0004
Impacto visual	0,006	0,0025

Tabla 28. Resultados numéricos del análisis de sensibilidad a partir del método Morris

#### **5.4. APLICACIÓN DE MODELOS DE LOCALIZACIÓN BASADOS EN PROGRAMACIÓN LINEAL ENTERA PARA LA UBICACIÓN DE PLANTAS DE BIOMASA**

En el capítulo 3, donde se realizó un detallado resumen de los modelos de localización basados en programación lineal, vimos que éstos son ampliamente utilizados para la optimización de localización de instalaciones. En nuestro caso se aplicarán a localización óptima de plantas de biomasa y de centros de transferencia en la comarca de Utiel-Requena.

Esta instalación es considerada en el estudio como semideseable, es decir, no pueden clasificarse como no deseable porque dichas instalaciones ofrecen servicios y beneficios a sus usuarios y población, pero provocando al mismo tiempo efectos adversos, disminuyendo así, en cierto modo, la calidad de vida a las zonas urbanas y entorno natural circundante.

En el estudio se han aplicado varios tipos de modelos de localización: el problema del p-mediano, el problema de cobertura máxima y una tercera estrategia que es la matriz de O-D. Estos fueron elegidos por dos motivos. Por un lado, minimizar la distancia e intentar que la nueva instalación esté ubicada lo más cerca posible de los puntos de demanda (biomasa) para minimizar los costes. Y por otro, al minimizar las distancias al mismo tiempo también se están minimizando los efectos adversos y molestos que provoca dicha instalación en las poblaciones cercanas.

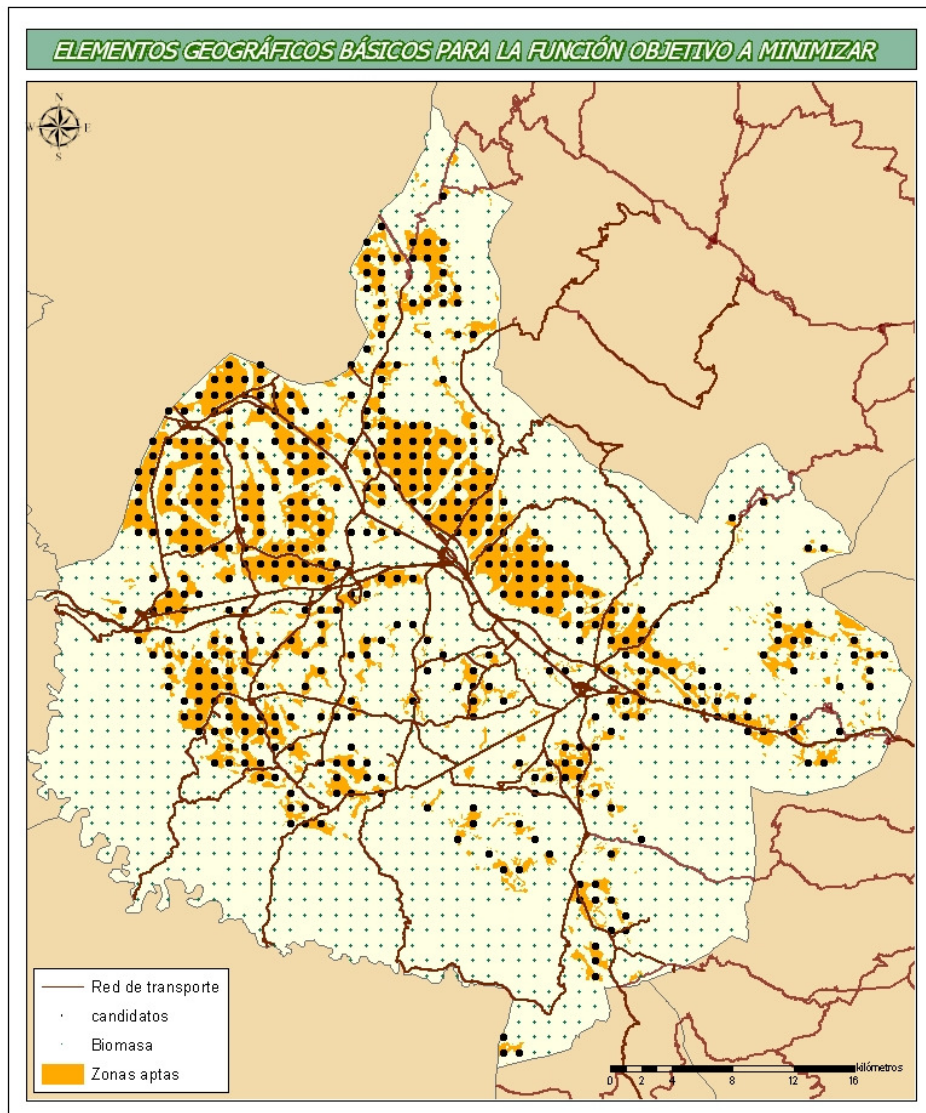
Normalmente, en nuestro planteamiento, se deberían utilizar modelos como el Maximin o el Maxisum para localizar estas instalaciones tan lejos como fuera posible de la población, pero el coste económico aumentaría considerablemente. Por ello, para respetar el medioambiente, no provocar malestar ni perjuicios a la población y cumplir con la legislación vigente, únicamente serán lugares candidatos una preselección de ubicaciones que coincidirán con las zonas aptas resultado de la EMC (apartado 5.3.4.).

La materialización de estas estrategias logísticas han sido realizadas mediante el software ArcInfo Workstation en su versión 9.2 empleando para ello el modulo Network Analysis el cual tiene implementados diversos modelos de localización basados en el p-mediano y en coberturas. Los datos de partida comunes a todos los modelos que van a ser aplicados en el entorno SIG serán los que se representan en la Figura 27 y detallamos a continuación:

- El número de lugares candidatos para albergar la planta de biomasa asciende a 462 ubicadas obtenidas a partir de las zonas catalogadas como aptas calculadas mediante evaluación multicriterio en el apartado anterior 5.3.4.
- La demanda quedará representada por los puntos de aportación de la biomasa compactada y concentrada en 1.760 puntos (a partir de la malla regular de 1km<sup>2</sup> de lado que cubre la comarca cuyos centroides son los puntos de biomasa).
- La red de transporte, sobre la cual se medirá el desplazamiento total, tiene las siguientes características:

Número de aristas totales (l)	26.158
Número de nodos totales (n)	21.630
Índice Beta	0,82





**Figura 27. Elementos comunes utilizados en los modelos de localización**

Como se explicó en el apartado 3.1.6.1, el *algoritmo de Intercambio* (TEITZBART) es uno de los heurísticos de mejora más ampliamente utilizados para resolver el problema p-mediano. Para la resolución de un problema de localización es necesario analizar cada una de las alternativas pudiendo alcanzar un elevado número que viene representado por la siguiente ecuación:

$$\text{alternativas} = \frac{n!}{m!(n-m)!} \quad \text{Ec. 37}$$

donde,

n es el número de candidatos  
 m es el número de sitios a elegir

En nuestro caso particular, para la ubicación de una única planta de biomasa nos encontramos con 462 posibles candidatos y, en esta primera estrategia logística un único sitio a elegir, con lo que el número de alternativas o combinaciones se reduce a 462 posibilidades. Pero en el caso que quisiéramos elegir cinco sitios, el número de alternativas se eleva a 171.631.757.682, cuya cifra haría inviable la resolución de este problema e incluso otros más pequeños, con lo que se hace necesario el empleo de heurísticos para resolverlos en un tiempo computacional aceptable. A pesar de que este algoritmo no garantiza encontrar una solución óptima, siempre encuentra una solución muy próxima al óptimo a la cual nos referimos como óptimo local. El grado de optimización que se alcanza depende fundamentalmente del tamaño del problema que se está intentando resolver y de las prestaciones del equipo informático empleado. Este heurístico empieza el proceso con una solución inicial temporal de  $m$  candidatos que van siendo sustituidos por otros candidatos hasta llegar a alcanzar el óptimo local, que se encontrará cuando la distancia total ponderada no se reduce y todos los candidatos han tenido la oportunidad de ser sustituidos e incluidos en el cálculo. Para encontrar la solución inicial temporal cada candidato es analizado con respecto a los puntos de demanda de su proximidad (vecindad, por ejemplo 10) para maximizar la expresión:

$$Max \sum_{i=1}^{10} \frac{W_i}{d_{ij}^2} \quad \text{Ec. 38}$$

donde,

- i es la ubicación de la demanda con el fin de aumentar la distancia
- j es la localización de del candidato
- $W_i$  es la cantidad de demanda en i
- $d_{ij}$  es la distancia entre i y j

Otro posible algoritmo que podemos elegir para la resolución del problema de localización y que también vimos anteriormente es el metaheurístico GRIA (Global Regional Interchange Algorithm). A pesar de que es un heurístico más moderno se aplica en este tipo de problemas sobre todo porque en la práctica cuanto más grandes son los problemas a resolver el GRIA requiere menos tiempo computacional y crece linealmente, al contrario que el Teitzbart que crece de manera exponencial.

Finalmente, el algoritmo TEITZBART es el elegido para resolver los problemas que se plantean en este apartado puesto que ofrece mejores resultados frente al GRIA cuando las localizaciones de los candidatos son diferentes de las de la demanda<sup>43</sup>.

Respecto al tiempo de cálculo en la búsqueda del camino más corto, mediante el algoritmo de Dijkstra, se emplean muchos más recursos computacionales resolviendo el camino más corto a través de la red de transporte que empleando la distancia euclídea o

---

<sup>43</sup> Esto es debido a que el GRIA en su fase regional solo evalúa los candidatos que son demanda.

la de Manhattan. Sin embargo, mediante el algoritmo de Dijkstra el cálculo de las distancias es más exacto por lo que se ha empleado este algoritmo.

A continuación veremos las diferentes estrategias que se han llevado a cabo a la hora de ubicar una planta de biomasa tomando como escenario la comarca de Utiel-Requena. En nuestro caso de estudio para la producción energética se utilizan residuos procedentes de podas agrícolas y forestales que serán recogidos y transportados hasta dicha planta de biomasa. La evaluación y tipología de la cantidad de biomasa que se va a transportar ha sido explicada en el apartado 5.2.2. Evaluación y caracterización de los recursos de la biomasa.

En primer lugar, describiremos la localización óptima de una única planta de biomasa mediante la aplicación del problema p-mediano con demanda ponderada. En segundo lugar, y haciendo eco de algunos autores que han sugerido la instalación de centros de transferencia o de almacenamiento previo traslado de la biomasa a la planta, se plantea un modelo clasificado como jerárquico. En tercer lugar se resuelve el problema mediante el problema de máxima cobertura. Y finalmente, se resuelve mediante una matriz de Orígenes-Destinos para conocer los valores de todos los lugares candidatos.

#### *5.4.1. Localización óptima aplicando el problema P-Mediano*

Resumiendo, el problema **P-mediano** (o también conocido como minisum o problema de Weber) consiste en localizar un número  $p$  de instalaciones dado, de entre un número  $n$  de lugares candidatos, minimizando un criterio de coste (la distancia total). En nuestro caso se emplea espacio discreto, de modo que la red de transporte está formada por arcos y nodos, y para calcular la distancia no se calcula en línea recta, sino que se emplea el algoritmo de Dijkstra de caminos mínimos a través de las vías de transporte existentes. Además, este problema lleva asociado un peso en los puntos de demanda (demanda ponderada), significando que no todos los puntos de demanda contribuyen igual.

El objetivo concreto de la aplicación de este modelo es minimizar el coste de transporte obteniendo el mejor emplazamiento para la nueva instalación, siendo éste el que cumpla la mínima distancia a todos los puntos de demanda. La demanda a su vez estará ponderada por la cantidad de biomasa a transportar en cada punto de recogida, y concretamente ponderada por el número de viajes que tenga que realizar el camión para trasladar esa biomasa empacada desde el punto de recogida  $i$  a la instalación  $j$ .

Además, se han de establecer las restricciones para los diferentes planteamientos del problema que vamos a analizar, y estas son: 1) fijar el número de instalaciones previamente al cálculo, y 2) asegurarse de que los puntos de aportación de biomasa (demanda) sirven a la instalación más cercana.

Además en los problemas que se plantean a continuación hay dos matices que se han establecido para todos ellos: el metaheurístico empleado es el TEITZBART y el criterio de resolución es el de “mínima distancia”.

La formalización del principio del p-mediano o minisum, mediante programación matemática, para minimizar el valor  $Z$  en la función objetivo  $s$  representa en la Tabla 29.

FUNCIÓN OBJETIVO	VARIABLES
$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n w_i \cdot d_i \cdot x_{ij}$	<p><math>i = 1, \dots, m</math> es la localización de la demanda.  <math>j = 1, \dots, n</math> son los lugares candidatos.  <math>d_{ij}</math> es la distancia más corta entre la localización de la demanda <math>i</math> y los lugares candidatos <math>j</math>.  <math>w_i</math> es el peso del punto de demanda <math>i</math>  <math>x_{ij} = 1</math>, si la demanda <math>i</math> se cubre con la instalación en <math>j</math>, y 0 en otro caso.</p>

Tabla 29. Función objetivo y variables del problema p-mediano

**Caso de estudio**

Resolviendo<sup>44</sup> el modelo de localización-asignación con los datos de entrada mencionados para una única instalación, obtenemos los siguientes valores estadísticos del punto de localización óptimo con identificador 881:

- Elementos totales: 1.760 puntos
- Demanda total – nº de viajes: 10.074,5
- Biomasa Total: 100.745.47 toneladas
- Distancia total recorrida: 29.173,93 km
- Distancia total recorrida ponderada: 141.722,31 km
- Distancia media recorrida: 16,57 km
- Distancia media recorrida ponderada: 14,07 km
- Distancia más larga: 35 km

Con estos valores y empleando la formulación para el cálculo de costes de biomasa (CBi) descrito en el capítulo2 apartado 2.5 es posible obtener el coste por tonelada de biomasa. Para ello debemos sustituir en la ecuación los valores de: número de viajes y la distancia total ponderada, siendo:

$$CB_i (\text{€}) = 127 * NV + 2,05 * \sum_i^n d = 1.569.991.6 \text{ €} \tag{Ec. 39}$$

$$CB(\text{€} / t) = \frac{1.569.991.6}{100.745,47} = 15,58 \text{ €} / t$$

Del mismo modo se obtienen los resultados para los cuatro siguientes puntos óptimos<sup>45</sup> con la finalidad de conocer al menos cinco ubicaciones óptimas con la posibilidad de tener diversidad de alternativas en la toma de decisión. Los principales resultados se de cada uno de ellos se muestran en la Tabla 30 y gráficamente en la Figura 28.

<sup>44</sup> En el Anexo III se describen detalladamente como resolver este tipo de problemas el SIG

<sup>45</sup> El cálculo de estos cuatro puntos óptimos se ha realizado de manera individual

ID	DISTANCIA TOTAL	DISTANCIA TOTAL PONDERADA	DISTANCIA MEDIA PONDERADA	DISTANCIA MÁS LARGA	COSTE (€/t)
881	29.173	141.722	14,07	35	15.58
984	29.738	141.886	14,08	34,2	15.58
987	29.246	141.931	14,09	33	15.58
1038	29.647	142.242	14,11	33,3	15.59
1039	29.485	142.252	14,12	32,3	15.59

Tabla 30. Resultados de las cinco mejores ubicaciones según el p-mediano (calculado en Km)

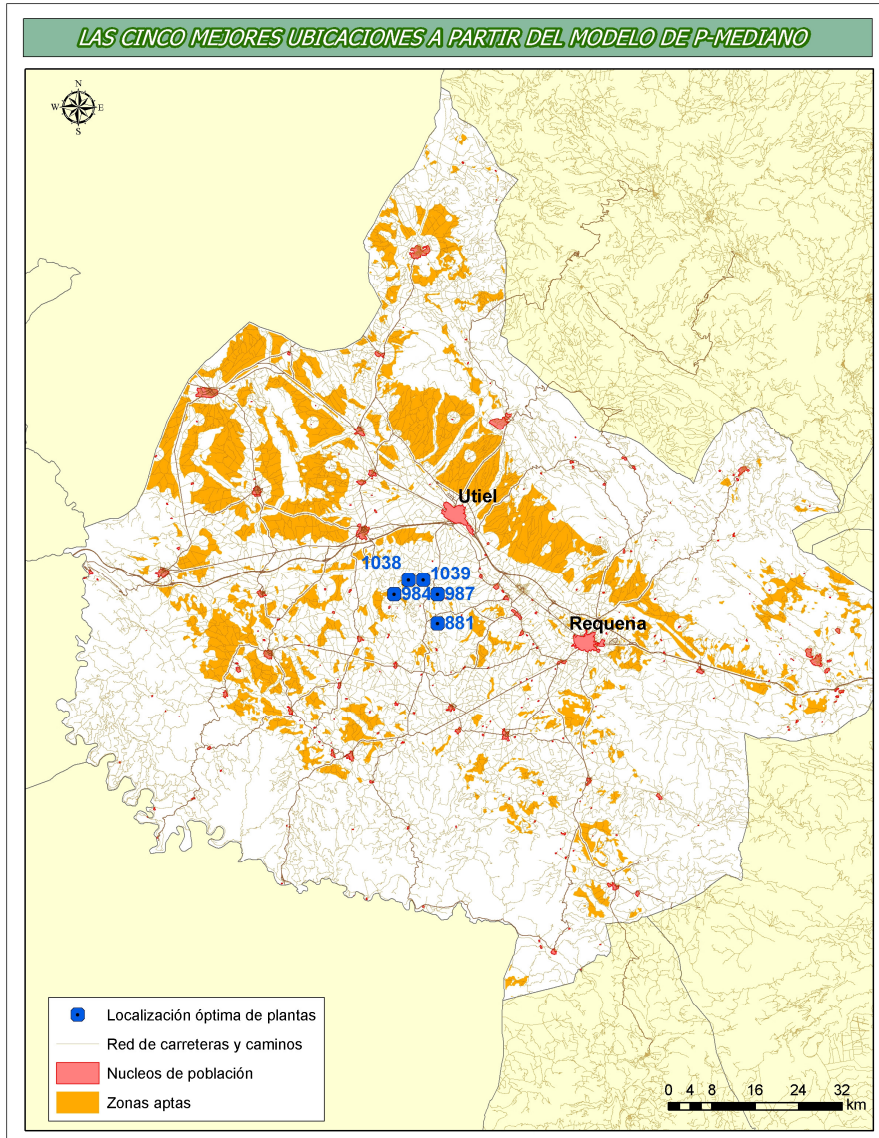


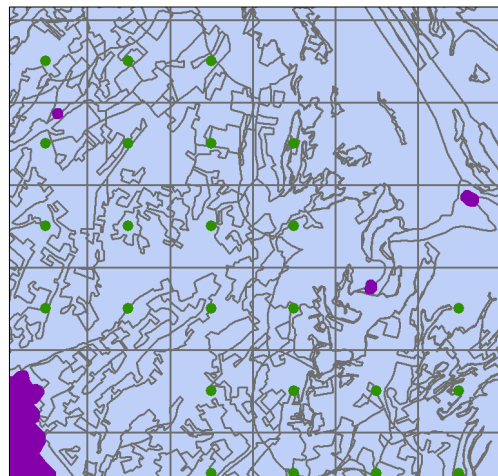
Figura 28. Representación de las cinco mejores ubicaciones globales a partir del p-mediano

Podemos observar que los resultados de estas cinco ubicaciones (círculos de color rojo) son realmente similares, y la localización de las mismas se concentra en la zona centro de la comarca. Podríamos concluir respecto a esto que cualquiera de ellas minimizaría los costes y sería una ubicación idónea para la localización de una planta de biomasa.

Debemos tener en cuenta que la distancia ponderada que calcula la resolución del problema es únicamente de ida, por lo tanto, en realidad, para recoger toda la biomasa de la comarca de Utiel-Requena son necesarios recorrer 283.444 km. Si estimamos una velocidad media del camión que transporta la biomasa de 40km/h se deduce que son necesarias aproximadamente 7.100 horas de trabajo para trasladar la biomasa compactada desde sus orígenes hasta la planta. Esto quiere decir que si los operarios/personal realizan jornadas laborales de 8h/día por operario se necesitarían 885 días laborables para recoger toda la biomasa. Por lo tanto es necesario alquilar o comprar más de un camión de transporte (cuya unidad de transporte sea de entre 10-15t de carga) para gestionar y aprovechar toda la biomasa de la comarca anualmente.

Los costes (€/t) que se obtienen a partir de las ecuaciones planteadas para las cinco mejores ubicaciones se encuentran dentro de los márgenes de los precios del mercado de la biomasa, siendo incluso positivos. Esto es debido a que en la metodología se realiza una aproximación en la fase inicial dejando fuera los costes de almacenamiento y pretratamiento de la biomasa desde el propio campo, es decir, al acumular la biomasa en el centroide de cada uno de los cuadrados de 1 km<sup>2</sup> (1.760 puntos de aportación) de la malla regular que cubre toda la comarca se están omitiendo unos costes que pasamos a explicar.

En la práctica, la gestión de estos residuos se realiza en primer lugar, mediante transporte a granel realizando operaciones de carga y descarga en cada campo, recorriendo pequeñas distancias, y almacenando esta biomasa en un lugar cercano, para posteriormente compactarla y embalarla para ser trasladada a la planta de biomasa para su producción de energía y/o calor.



**Figura 29. Distribución de parcelas y gestión de la biomasa en el interior de cada km<sup>2</sup> de la malla regular. Los puntos verdes son los lugares de acumulación de la biomasa**

Como vemos en la Figura 29 cada cuadrado encierra la cantidad de biomasa que se genera a partir de la suma de las hectáreas de cada tipo de cultivo y aplicando sus correspondientes coeficientes para obtener dicha cantidad (ver el apartado 5.2.2). En este sentido, para paliar la omisión de estos costes de gestión y almacenamiento previos, se asume que:

- Cada uno de los cuadrados tiene aproximadamente 60 toneladas de biomasa (es la media obtenida en la comarca de Utiel-Requena).
- Los camiones que transportan a granel (carga máxima 3t) en primera instancia realizan entre 15 y 20 operaciones de carga/descarga diarias.

En la Figura 30 vemos en detalle en que consiste el transporte a granel dentro de estas áreas de 1km<sup>2</sup> que se establecieron como una aproximación y generalización en el momento de gestionar la biomasa. Las líneas azules representan la red de transporte por donde circulará el camión y que habitualmente son caminos que delimitan las parcelas agrícolas, el punto central de color verde (destino) sería el punto de almacenamiento donde ésta se acumularía procedente de cada uno de los puntos de aportación de biomasa (orígenes) gestionados por el propio agricultor a “pie de campo”, en color negro.

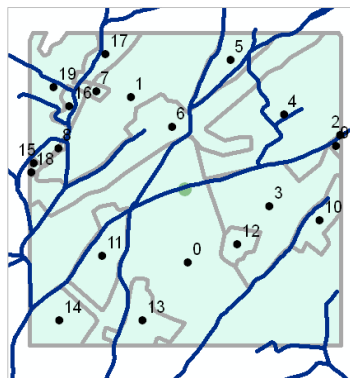


Figura 30. Ejemplo de las operaciones de recogida de biomasa a “pie de campo”

De modo que, aplicando el modelo p-mediano ponderado desde los 20 orígenes de biomasa hasta el único destino (punto de acumulación) se recorren 14,3 km y se recogen 56 t de biomasa. Aplicando la ecuación de coste a granel calculada en el capítulo 2 apartado 2.5.1:

$$CB_i \text{ a granel}(\text{€}) = 41 * NV + 1.5 * \sum_i^n d \quad \text{Ec. 40}$$

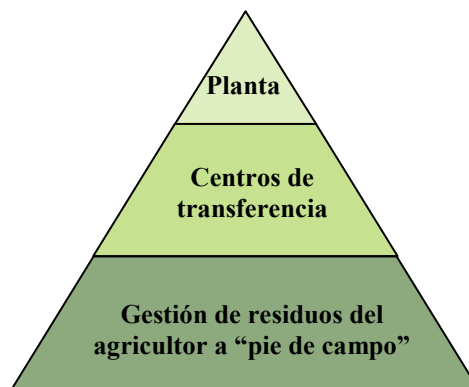
obtenemos un coste de 467 € por cada km<sup>2</sup>, lo que supone, extendiendo este coste a los 1760 cuadrados que cubren la comarca, un coste total adicional de 822.713 €. Se trata de una cantidad considerable y a tener en cuenta en el caso de que la compactadora encuentre dificultades en el acceso a las parcelas agrícolas.

Los resultados de este ejemplo serán extrapolados al resto de cuadrados de 1 km<sup>2</sup> cubriendo la comarca de Utiel-Requena (1.760) se pueden consultar en el Anexo V.

5.4.1.1. **Implementación del problema P-Mediano implantando centros de transferencia**

En el capítulo 5 vimos que existía un tipo de modelo de localización derivado del p-mediano clásico en el cual las instalaciones están estructuradas en niveles, es decir, que no son homogéneas en cuanto al servicio que ofrecen, siendo éste de diversos tipos. Nos referimos al problema con estructura jerárquica, en el cual debemos definir la relación entre los diferentes niveles, disponibilidad del servicio en cada nivel y la configuración espacial de éstos.

Aplicando dicho modelo al caso de localización de una planta de biomasa nos encontramos con tres niveles bien diferenciados. El primer nivel, “a pie de campo”, en la mayoría de los estudios no se tiene en cuenta, es el que realiza el propio agricultor para gestionarse, en primera instancia, los residuos agrícolas que se generan en su parcela. En segundo nivel, se establecen determinados centros de transferencia. La principal función de éstos es la de almacenar y pretratar la biomasa previamente a ser transportada a la planta. Por último, nos encontramos con el nivel más alto de la estructura, ocupado por la planta de biomasa propiamente dicha para la generación de electricidad y/o calor (cogeneración). La Figura 31 muestra la estructura jerárquica planteada.



**Figura 31. Estructura del problema de localización con jerarquías para la ubicación óptima de una planta de biomasa**

A continuación, veremos como se ha llevado a cabo esta estructura en la práctica y que resultados hemos obtenido de dicha aplicación. En primer lugar la pregunta que debemos plantearnos es ¿Cuántos centros de transferencia debemos localizar?. Como hemos comentado anteriormente, a pesar de que la implantación de estos centros conlleva un coste económico asociado (cercado, operarios para su mantenimiento, terrenos, cubiertas para su adecuado almacenamiento) se hace necesaria la localización de dichos centros por la imposibilidad de la accesibilidad de la maquinaria para compactación en muchas parcelas agrícolas y las consiguientes operaciones de carga por camiones voluminosos.

Para ver como se comportan los costes y en que medida influye el número de centros de transferencia hemos resuelto el modelo de localización-asignación para un determinado número de centros, empezando con la localización de dos, luego de cuatro, luego de ocho, y así sucesivamente hasta 132 para ver el comportamiento de éstos en las



ecuaciones globales de costes. En este caso, debemos introducir los datos de los dos niveles anteriormente mencionados, y que serán los que mostramos a continuación:

1) Las restricciones en este caso son: el número de instalaciones a ubicar en el nivel más bajo son 2 de entre 462 lugares candidatos. En este caso, toda la biomasa se acumulará en centro de transferencia más cercano (menor distancia ponderada) y obtendremos las dos ubicaciones óptimas. En la siguiente fase, se busca localizar la planta de biomasa en función de dónde se encuentra ahora la biomasa y de los otros 460 restantes lugares candidatos, para obtener una única localización óptima final.

	C.T-1	C.T-2	PLANTA
Identificador	1176	560	232
Elementos totales	854	906	2
Demanda total – nº de viajes	5.471	4.603	5.596
Biomasa total recogida (t)	54.715	46.030	100.740
Distancia total recorrida (km)	10.803	11.590	18,6
Distancia total ponderada (km)	60.730	47.280	48.281
Distancia media recorrida (km)	12,6	12,8	9,3
Distancia más larga (km)	30	25,8	17,6
Distancia total (km)	312.582		

**Tabla 31. Valores estadísticos obtenidos para dos centros de transferencia, distancias en km**

Con estos valores y empleando la formulación para el cálculo de costes de biomasa (CB<sub>i</sub>) compactada es posible obtener el coste por tonelada de biomasa. Para ello debemos sustituir en la ecuación los valores de: número de viajes y la distancia total ponderada para cada centro de transferencia, siendo:

$$\begin{aligned}
 C.T-1 \quad CB_i(\text{€}) &= 127 * NV + 2.05 * \sum_i^n d = 819.377 \text{ €} \\
 C.T-2 \quad CB_i(\text{€}) &= 127 * NV + 2.05 * \sum_i^n d = 681.508 \text{ €}
 \end{aligned}$$

**Ec. 41**

Para calcular la fase de traslado de los centros de transferencia a la planta elegida como lugar óptimo utilizaremos la expresión de biomasa sin compactación, puesto que la biomasa ya ha sido compactada previamente, según la ecuación:

$$\text{Planta} \quad CB_i(\text{€}) = 41 * NV + 1,5 * \sum_i^n d = 301.857 \text{ €}$$

**Ec. 42**

En esta fase la unidad de transporte del camión puede aumentarse de 10t de carga a 18-20t, es decir, el camión puede tener mayor capacidad de carga puesto que la accesibilidad en esta fase ya no es un problema debido a la posibilidad de elección de terrenos con mayor amplitud para las operaciones con maquinaria.

Una vez resueltos y analizados los resultados es posible calcular el coste total de biomasa empleando centros de transferencia, realizando la suma de los costes de cada

fase, y añadiéndole un coste aproximado de 6.000 euros por centro de transferencia instalado. En Tabla 34 aparecen estos costes como resultado de contabilizar 400 metros lineales de vallado por cada uno de los centros de características: 200 Alto /17 Hilos Horiz. /15 cm, Rollo 50 m. con un coste de 300 € (malla ganadera) o Panel MAMUT Pre-Galv. 2.50x0.63. con un coste de 14,05 €/m lineal (malla electrosoldada) según precios actuales de mercado (Grupo DMD 2011).

Aplicando las ecuaciones siguientes obtendríamos el coste de biomasa por tonelada.

$$Costes_{CT-1} + Costes_{CT-2} + Costes_{Planta} + Coste_{instalar\ centros} = 1.814.743 \text{ €} \quad \text{Ec. 43}$$

$$CB(\text{€} / t) = \frac{1.814.743}{100.745,47} = 18,01 \text{ €} / t \quad \text{Ec. 44}$$

2) El proceso se repite con los diferentes modelos jerárquicos, localizando de manera óptima 4, 6, 8, 16, 32 y 64 centros de transferencia de entre 462 candidatos y asignando la demanda a la instalación más cercana. La representación espacial de la asignación de la demanda para cada estructura la vemos en la Figura 32 en forma de gráficos de araña.

Estos gráficos de araña simbolizan la configuración que tiene cada estructura jerarquía y muestra, a grandes rasgos, dos de los objetivos primordiales. En primer lugar donde se localizan los centros de transferencia óptimos cuando se toman 2, 4, 6, 8, 16 o 32, siendo estos los lugares donde convergen las líneas en color negro. Por otro lado, se representa la distribución de la demanda, es decir, los puntos de aportación de la biomasa respondiendo al criterio que siempre se asigna al centro de transferencia más cercano, con el objetivo de minimizar las distancias. De modo que, el origen de cada una de las líneas es un punto de aportación de biomasa y el final corresponde con los la ubicación óptima de los centros de transferencia según el caso que se esté estudiando

Comparando la imagen de 2 centros de transferencia con la de 32 centros se observa que, las distancias en este último son mucho menores, es decir, al aumentar el número de centros de transferencia disminuyen drásticamente las distancias, tal y como se observa en la tabla siguiente.

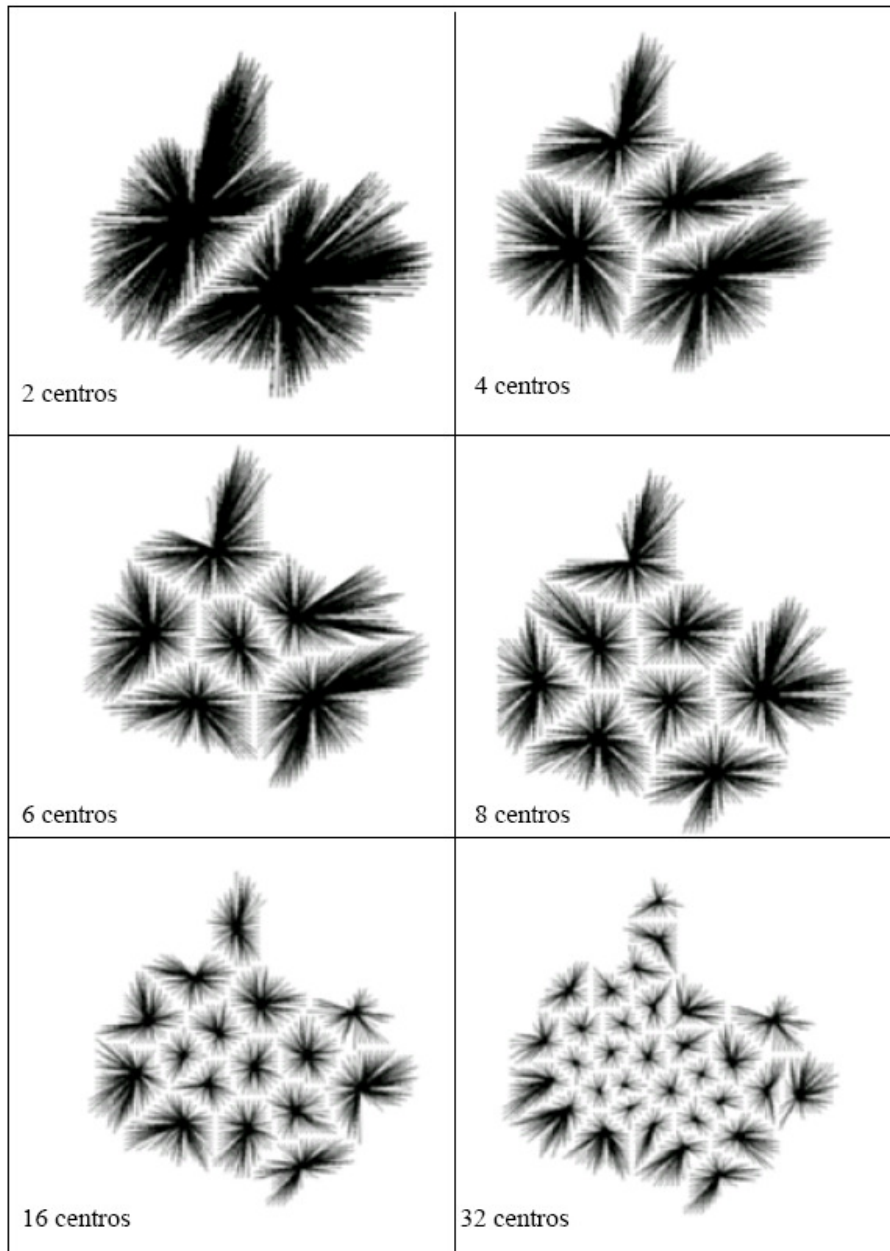


Figura 32. Representación espacial de la localización de los centros de transferencia (2, 4, 6, 8 y 16) y la asignación de la demanda (biomasa)

De modo se que obtienen los resultados para las siete estructuras jerárquicas con la finalidad de conocer como varían los costes al implantar estos centros. Los principales resultados se muestran en las Tabla 32 y Tabla 34.

Nº DE CENTROS	DISTANCIA TOTAL	DISTANCIA TOTAL PONDERADA	DISTANCIA MEDIA	DISTANCIA MÁS LARGA	Nº VIAJES (SOLO IDA)
2 CT	10.803	60.730	12,6	30,1	5.471
	11.590	47.280	12,8	25,8	4.603
4 CT	2.884	14.008	8,4	22,3	2.096
	4.499	26.488	8,8	17	3.367
	5.743	20.926	10,3	22,4	2.528
	3.061	15.973	8,5	19,4	2.081
6 CT	2.197	12.020	7,1	14,8	1.962
	859	8.214	5,0	9,2	1.645
	2.383	8.145	8,1	20,2	1.247
	3.783	13.905	9,1	21,1	1.853
	2.514	13.595	7,9	18,4	1.878
	1.768	8.260	6,7	15,1	1.436
8 CT	1.367	7.205	6,07	12,5	1.359
	754	6.797	4,8	9,2	1.461
	1.006	5.905	5,4	10,7	1.196
	1.405	5.666	6,1	11,7	1.017
	1.204	8.176	6,02	14,2	1.514
	1.533	7.868	6,9	15,2	1.222
	2.564	6.851	7,8	16,7	1.064
	1.322	6.510	6,09	12,6	1.238
16 CT	463	2.941	4,2	9,2	735
	293	2.899	3,4	5,8	844
	398	1.815	3,9	7,1	536
	634	1.961	4,9	9,8	504
	240	2.108	3,3	6,1	643
	852	3.984	5,4	11,7	871
	550	2.623	4,5	9,2	670
	175	1.631	2,9	5,3	576
	768	3.636	5,1	11,1	809
	939	2.015	5,5	10,8	450
	355	593	4,2	8,4	170
	363	2.489	3,8	8,1	666
	220	2.118	3,2	6,1	670
	532	2.828	4,3	8,2	712
	540	2.653	4,4	9,2	643
	549	2.651	4,5	10	580
32 CT	6.025	28.437,6	3,4	10,6	10.074
64 CT	4.863	21.636,1	2,7	10,3	10.074

**Tabla 32. Principales resultados instalando centros de transferencia (distancias en km)**

Como podemos observar en la Tabla 32 las distancias, ya sean totales, ponderadas, distancias medias en un trayecto o la distancia al punto más alejado, van descendiendo según van aumentándose el número de centros. Partimos de una distancia total ponderada para dos centros de transferencia de 108.010 km llegando a 21.636 km con 64

centros. A primera vista, podría pensarse que puesto que la distancia total ponderada se ha reducido considerablemente, podemos deducir que a mayor número de centros menor coste. Pero esto no es cierto, según se refleja en la Tabla 34 debido a que cada centro de transferencia se comporta como una planta en si misma, es decir, se le ha de aplicar a cada uno de ellos la ecuación de costes con compactación (Costes Fijos t Costes Variables), además de los gastos que conlleva la implantación cada uno de ellos.

Nº DE CENTROS	DISTANCIA TOTAL	DISTANCIA TOTAL PONDERADA	DISTANCIA MEDIA	DISTANCIA MÁS LARGA	Nº VIAJES (SOLO IDA)
A planta 2 CT	18,6	48.281	9,3	17,6	5.596
A planta 4 CT	46,6	64.088	11,6	14,5	5.596
A planta 6 CT	69,1	66.244	11,5	17,4	5.596
A planta 8 CT	107	76.133	13,4	20,2	5.596
A planta 16 CT	209,9	67.838	14	25	5.596
A planta 32 CT	6.025	28.437,6	3,4	10,6	5.596
A planta 64 CT	4.863	21.636,1	2,7	10,3	5.596

**Tabla 33. Principales resultados de trasladar la biomasa desde los centros de transferencia compactada a la planta (ubicación óptima) a partir del p-mediano**

En la Tabla 34 se muestra un resumen de los costes asociados a esta estructura jerárquica planteada junto con la representación gráfica de Figura 33. Se vislumbra una leve disminución en el coste de la biomasa según va aumentando el número de centros de transferencia, lo que queda contrarrestado cuando se incluyen los costes unitarios de los centros de transferencia. Se puede observar que los costes (C2) de transportar la biomasa desde los centros de transferencia hasta la ubicación óptima de la planta no presentan grandes variaciones, y son considerablemente inferiores a los costes empleando centros de transferencia. Finalmente, el Coste Total muestra la situación global a partir de los costes anteriores, siendo el más elevado para la instalación de 2 centros y disminuyendo éste hasta la implantación de 16 centros.

Nº DE CENTROS	COSTE DE CENTROS (C1)	COSTE A LA PLANTA (C2)	COSTE (C1+C2)	COSTE INSTALACIÓN CENTROS	COSTE TOTAL
2 CT	1.500.818	301.857	1.802.676	12.000	1.814.676
4 CT	1.437.811	325.568	1.763.379	24.000	1.787.379
6 CT	1.408.267	328.800	1.737.067	36.000	1.773.067
8CT	1.391.721	333.135	1.724.857	48.000	1.772.857
16CT	1.337.764	339.135	1.676.900	96.000	1.771.900
32 CT	1.329.467	319.824	1.649.291	192.000	1.841.291
64CT	1.323.631	314.880	1.638.511	384.000	2.022.511

**Tabla 34. Costes totales instalando centros de transferencia con biomasa compactada a partir del p-mediano (coste calculado en euros)**

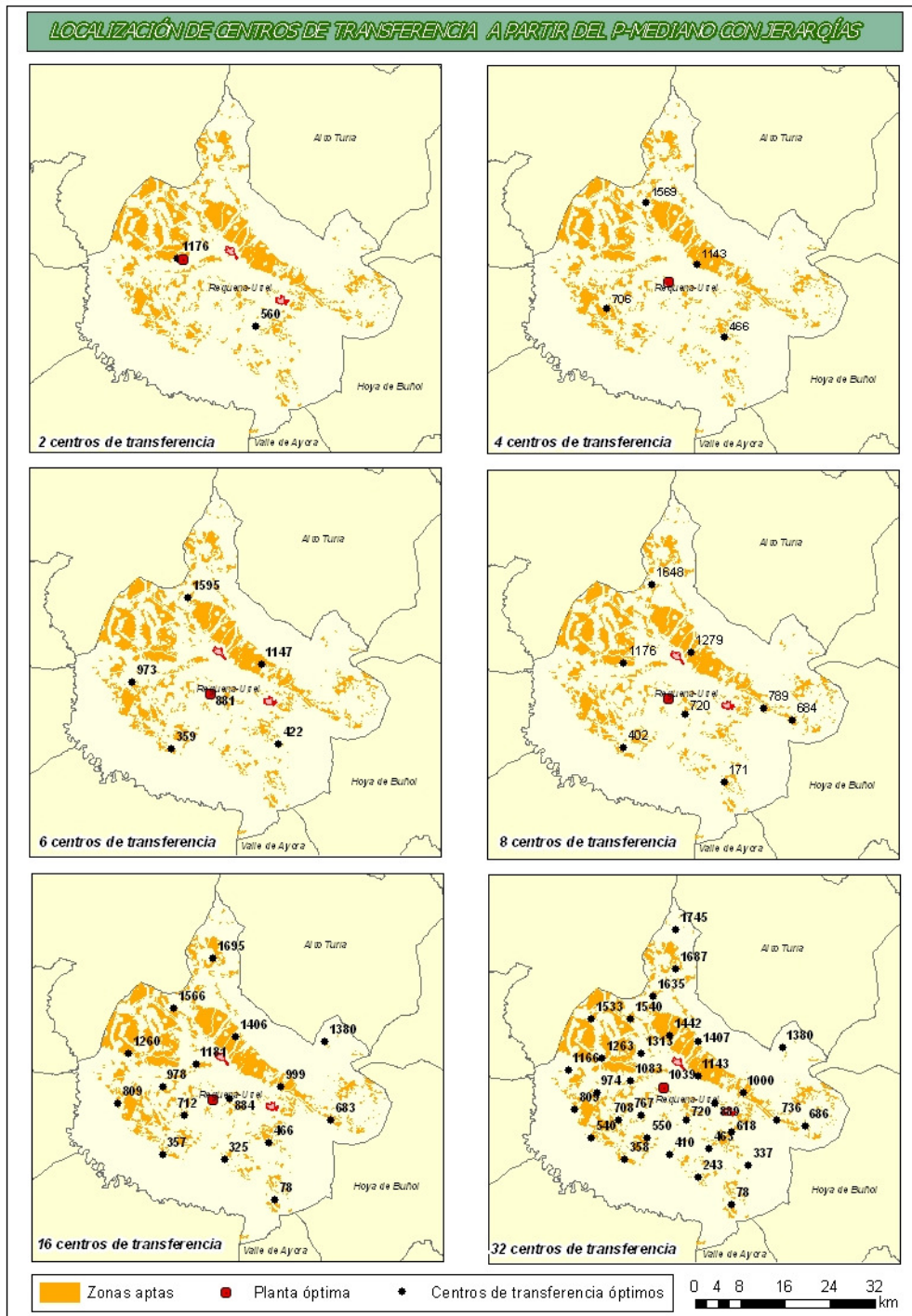
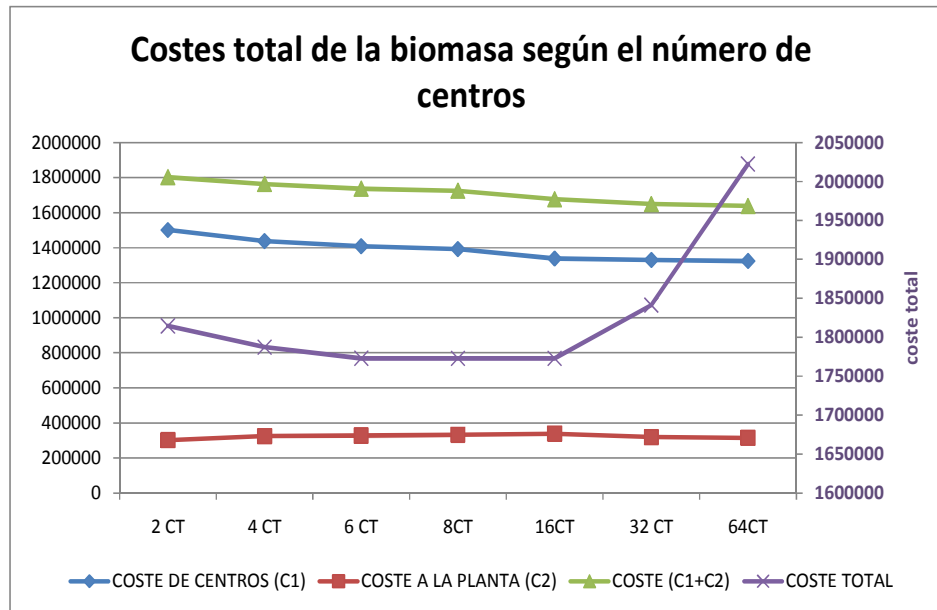


Figura 33. Localización de centros de transferencia a partir del p-mediano con jerarquías

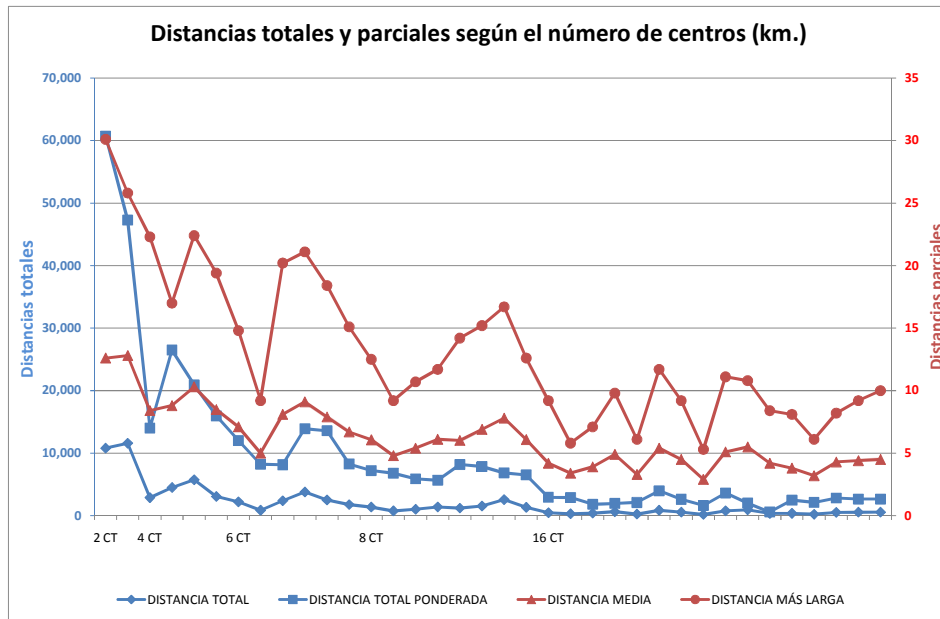
La principal conclusión que se desprende y que contesta a la pregunta planteada de cuántos centros de transferencia serían adecuados implantar para optimizar la logística y el transporte para la instalación de una planta de biomasa, sería que implantando 16 centros de transferencia según observamos en la Figura 34 optimizamos la estructura jerárquica planteada, es decir, alcanzamos el mínimo absoluto respecto al coste total.



**Figura 34. Costes de los centros de transferencia, costes la planta, y el coste total de la biomasa a partir del modelo p-mediano (calculado en euros)**

Al instalar a partir de 32 centros de transferencia las toneladas de biomasa media que se asigna a cada centro es aproximadamente 3.000 t, cantidad que descenderá considerablemente al aumentar el número de centros, así como para 64 centros donde la media se sitúa en 1.500 t.

En los resultados podemos apreciar, además, que las distancias más largas se reducen considerablemente según van aumentándose el número de centros de transferencia. Esto nos lleva a pensar que cuando la media de las distancias se encuentra en el rango de 2-3 km como se representa en la Figura 35, es logísticamente más adecuado transportar la biomasa a granel hasta un centro de transferencia y luego hasta la planta.



**Figura 35. Distancias más representativas en función del número de centros. Las líneas azules representan distancias globales y las líneas rojas distancias de trayectos individuales**

Veamos ahora si también es económicamente más ventajoso comparando los resultados obtenidos por compactación, anteriormente calculados, con los siguientes a granel a partir de la implantación de 16 centros de transferencia. De la Tabla 35 se vislumbra el aumento en los costes totales, superando incluso lo 4.000.000 €.

Nº DE CENTROS	COSTE DE CENTROS (C1)	COSTE A LA PLANTA (C2)	COSTE (C1+C2)	COSTE INSTALACIÓN CENTROS	COSTE TOTAL
2 CT	1.812.353	343.635	2.155.989	12.000	2.167.988
...	...	...	...	...	...
16CT	1.581.128	343.635	1.924.763	96.000	2.020.763
32 CT	1.519.396	342.360	1.861.756	192.000	2.053.756
64CT	1.485.869	319.880	1.805.749	384.000	2.189.749

**Tabla 35. Costes globales instalando centros de transferencia a granel con p-mediano (€)**

#### 5.4.2. Localización óptima aplicando el problema de máxima cobertura

Como vimos en el apartado 3.2.5.4. Problemas de localización con cobertura, estos modelos son formulados en función de la demanda cubierta, donde el punto de demanda puede ser cubierto por la instalación en el punto  $j$  si la distancia (o tiempo, u otros) entre ambos es menor que  $R$  (valor predeterminado), la cual se conoce como cobertura. El objetivo es maximizar la demanda a cubrir dentro de una distancia específica a partir de un cierto número de instalaciones de entre un conjunto de lugares candidatos.



Desde el punto de vista de la limitación del radio de recogida de la biomasa (estableciéndolo entre 30-50 km como plantean diversos autores en la bibliografía de referencia) la demanda (la biomasa) se convierte en punto esencial. Además, el número de instalaciones a localizar es fijado previamente, así como la distancia máxima recomendada (radio específico).

Como en el caso anterior la demanda estará ponderada por la cantidad de biomasa a transportar en cada punto de recogida, y concretamente ponderada por el número de viajes que tendrá que realizar el camión para trasladar esa biomasa empacada desde el punto de recogida  $i$  a la instalación  $j$ .

Además, se han de establecer las restricciones para los diferentes planteamientos del problema que vamos a analizar, y estas son: 1) fijar el número de instalaciones previamente al cálculo, y 2) asegurarse de que los puntos de aportación de biomasa (demanda) sirven a la instalación más cercana, y 3) el punto de demanda queda cubierto si está dentro del radio de recogida determinado.

La formalización del problema de máxima cobertura, mediante programación matemática, para maximizar  $Z$  en la función objetivo se representa en la Tabla 36.

FUNCIÓN OBJETIVO	VARIABLES
$MaxZ = \sum_{i=1}^n w_i \cdot z_{ij}$	$i = 1, \dots, m$ es la localización de la demanda. $j = 1, \dots, n$ son los lugares candidatos. $w_i$ es el peso del punto de demanda $i$ $z_{ij} = 1$ si la demanda $i$ es cubierto, y 0 en otro caso.

**Tabla 36. Función objetivo y variables del problema p-mediano**

Como se desprende de la formulación, se asume que la cobertura es binaria, es decir, o la demanda queda totalmente cubierta, o no. En la aplicación de este modelo se asume que el metaheurístico empleado es el TEITZBART y el criterio de resolución es el de “maximizar la demanda dentro de un radio de acción determinado”.

En la aplicación de este modelo, además, se asume que el capital de inversión es limitado, es decir, si el número de instalaciones o centros de transferencia está limitado, el planteamiento sería maximizar la cantidad de demanda (biomasa) que pudiera ser recogida con el menor número de instalaciones. De modo que este modelo respondería a dos cuestiones: 1) especificar el número de instalaciones que son necesarias para cubrir la demanda, y 2) determinar la relación entre el número de instalaciones y la cobertura.

**Caso de estudio**

Resolviendo<sup>46</sup> el modelo de localización-asignación de máxima cobertura limitando el radio máximo a 30 Km. y para la ubicación de una única planta, obtenemos los siguientes valores estadísticos del punto de localización óptimo con identificador 1039:

Elementos totales iniciales: 1.760 puntos de demanda (biomasa)

Demanda total – nº de viajes: 10.019

Biomasa Total asignada: 100.196 toneladas

Distancia total recorrida: 28.558,6 Km.

Distancia total recorrida ponderada: 140.598 Km.

Distancia media recorrida: 16,5 Km.

Distancia media recorrida ponderada: 14,1 Km.

Puntos de biomasa no asignados: 30

Biomasa no asignada: 548 toneladas

Con estos valores y empleando la formulación para el cálculo de costes de biomasa (CBi) descrito en el capítulo2 apartado 2.5 es posible obtener el coste por tonelada de biomasa. Para ello debemos sustituir en la ecuación los valores de: número de viajes (multiplicado por dos, ida y vuelta) y la distancia total ponderada, siendo:

$$CB_i(\text{€}) = 127 * NV + 2.05 * \sum_i^n d = 1.560.638 \text{ €}$$

**Ec. 45**

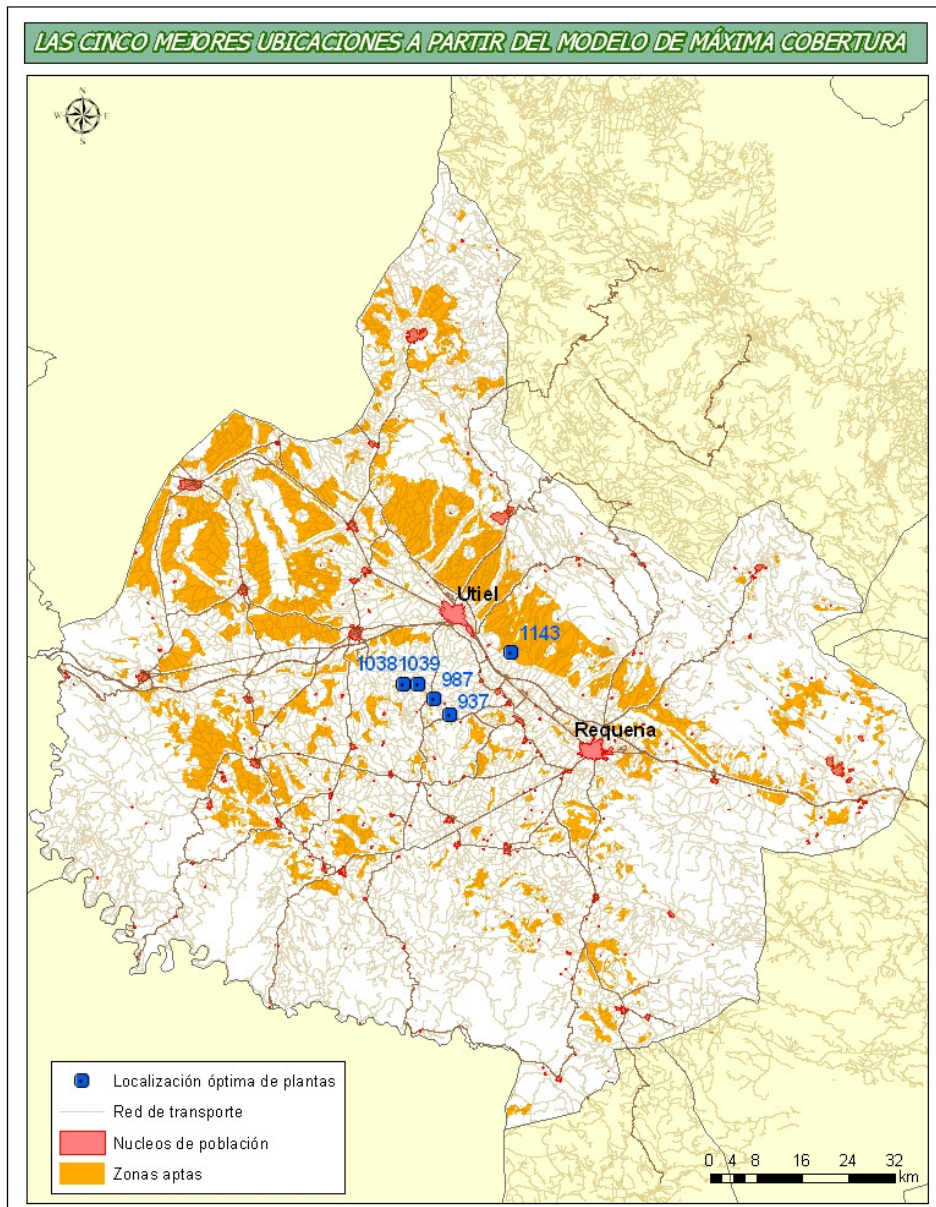
$$CB(\text{€} / t) = \frac{1.560.638}{100.196} = 15,57 \text{ €} / t$$

Del mismo modo se obtienen los resultados para los cuatro siguientes puntos óptimos con la finalidad de conocer al menos cinco ubicaciones óptimas y ampliar las alternativas en la toma de decisiones. De la Tabla 37 se desprende que el programa resuelve como óptimo aquel que, aun recorriendo mayor distancia soporta una menor pérdida en biomasa asignada. En cualquier caso los resultados son realmente similares en estos puntos óptimos, destacando la pérdida de biomasa de casi 900 toneladas en el caso de la ubicación 937 al estar limitada la distancia a 30 km. Los principales resultados son:

ID	DISTANCIA TOTAL	DISTANCIA TOTAL PONDERADA	DISTANCIA MEDIA PONDERADA	BIOMASA NO ASIGANDA	COSTE (€/T)
1039	28.558,6	140.598	14,1	548 t	15,57
987	28.598,6	140.050	13,9	607 t	15.56
1038	28.394,1	140.062	16,8	705 t	15.57
1143	29.754,7	154.419	17,1	796 t	15.80
937	28.552,1	139.804	17,3	886 t	15.56

**Tabla 37. Resultados principales de las cinco mejores ubicaciones (calculado en Km.)**

<sup>46</sup> En el Anexo VI se describe como resolver este tipo de problemas en entornos SIG



**Figura 36. Representación de las cinco mejores ubicaciones globales a partir del modelo de máxima cobertura**

Podemos observar que los resultados de estas cinco ubicaciones (círculos de color azul) son realmente similares, y la localización de las mismas se concentra en la zona centro de la comarca. Podríamos concluir respecto a esto que cualquiera de ellas minimizaría los costes.

#### 5.4.2.1. Implementación del problema de máxima cobertura con restricciones

Este modelo se asemeja al anterior, pero incorpora otra restricción. En este caso, ningún punto de aportación de biomasa (demanda) está alejado de una distancia establecida máxima, y por otra parte, la localización encontrada maximiza la cantidad de biomasa dentro de otro umbral de distancia menor que el anterior. El umbral máximo estará fijado en 30 km distancia por encima de la cual no se recogerá biomasa, y el umbral mínimo en 5 km dentro del cual se debe recoger la máxima biomasa posible, de este modo, se minimizarán las distancias y por tanto los costes, sacrificando cierta cantidad de biomasa. La formulación es idéntica en el caso anterior, únicamente se ha añadido una restricción más ya comentada. Veamos a continuación el caso de estudio.

Para determinar el número de centros necesarios, el planteamiento que se presenta a continuación es similar al que se ha planteado para el modelo de p-mediano, ir aumentando el número de centros de transferencia hasta recoger toda la biomasa, es decir, cubrir la demanda. En este contexto, se establece una limitación en la distancia que representará el radio de cobertura, ya que la distancia más larga a recorrer por el camión desde cada punto de aportación de biomasa al centro no debería ser mayor de 5km<sup>47</sup>. En la Tabla 38 se muestran los resultados alcanzados para cada elección de centros de transferencia.

Nº DE CENTROS	DISTANCIA TOTAL PONDERADA <sup>48</sup>	DISTANCIA MÁS LARGA	BIOMASA NO ASIGNADA	PUNTOS NO ASIGNADOS
2 CT	5.474,3	5	84.490 t	1.598
4 CT	10.332,7	5	69.825 t	1.436
6 CT	14.656,2	5	56.934 t	1.277
8 CT	17.379,3	5	47.536 t	1.135
16 CT	26.233,8	5	18.077 t	610
32 CT	26.912,7	5	5.728 t	208
40 CT	25.504,1	5	5.084 t	164
50 CT	24.774,8	5	4.980 t	157
100 CT	18.614,1	5	4.980 t	157
200 CT	13.630,5	5	4.980 t	157
300 CT	11.991,3	5	4.980 t	157

**Tabla 38. Resultados del modelo de máxima cobertura dependiendo del número de centros de transferencia establecidos (distancias en Km.)**

La conclusión que se desprende de los valores alcanzados y que podemos observar en la Figura 37 es que con 32 ó 40 centros de almacenamiento se recogería prácticamente la totalidad de la biomasa, más del 95%, recorriendo una distancia ponderada de aproximadamente 26.000 km (solo ida). De modo que, los kilómetros recorridos descienden considerablemente, sin embargo, no tenemos prácticamente pérdida de

<sup>47</sup> Esta distancia se ha establecido en función de la extensión del territorio, pero debe adaptarse a cada caso de estudio concreto.

<sup>48</sup> La distancia total ponderada en esta ocasión, únicamente se ha de considerar de manera orientativa ya que no es la real puesto que toda la biomasa no ha sido recogida en todos los casos.

residuos, es decir, económicamente sería mas ventajoso establecer esta estrategia de cobertura máxima. Además, estableciendo dicha distancia de cobertura, la estrategia podría declinarse para su transporte tanto hacia la compactación de la biomasa como a granel, eligiéndose aquella opción que resultará económicamente más viable, puesto que desde el punto de vista logístico ambas serían adecuadas.

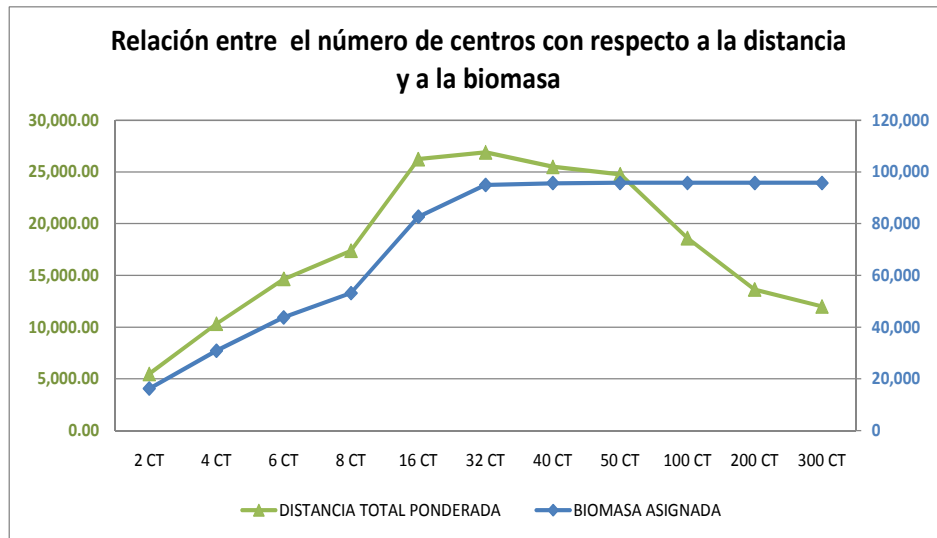


Figura 37. Relación entre el numero de centros de transferencia en función del la distancia total ponderada (línea verde) y la biomasa que es asignada (línea azul)

Aplicando la formulación siguiente obtenemos los costes totales de biomasa.

$$Costes_{CT_i} + Costes_{Planta} + Coste_{instalar\ centros} = 1.686.392 \text{ €} \quad \text{Ec. 46}$$

donde  $CT_i$  representa el número de centros de transferencia instalados

$$CB(\text{€/t}) = \frac{1.686.392}{95.012} = 17,7 \text{ €/t} \quad \text{Ec. 47}$$

Nº DE CENTROS	COSTE DE CENTROS (C1)	COSTE A LA PLANTA (C2)	COSTE (C1+C2)	COSTE INSTALACIÓN CENTROS	COSTE TOTAL (€)
16 CT	1.261.823	328.569	1.590.392	96.000	1.686.392
32 CT	1.267.114	325.125	1.592.240	192.000	1.784.240
40 CT	1.266.940	324.896	1.591.836	240.000	1.831.836
50 CT	1.254.310	323.941	1.578.252	300.000	1.878.252

Tabla 39. Costes globales instalado centros de transferencia a partir del problema de máxima cobertura (calculado en km)

Como vimos en el problema p-mediano con estructura jerárquica, el nivel más bajo es el que hemos denominado “a pie de campo”, y lo más parecido a dicha gestión de residuos por el agricultor sería resolver el modelo de máxima cobertura con un radio de actuación de 1km. Esta situación implicaría dos cosas. En primer lugar, que prácticamente todos los lugares candidatos se comportarían como centros de almacenamiento, recorriendo distancias muy pequeñas y empleando el transporte a granel. Y segundo, gran parte de la biomasa no sería recogida (no se cubriría la totalidad de la demanda) según podemos observar en la Figura 27 puesto que existen áreas donde habría que recorrer una mayor distancia para recoger la biomasa (zona sur) desde los lugares candidatos existentes.

#### **5.4.3. Determinación de localizaciones mediante la matriz Origen-Destino**

Esta última manera de resolver el caso de estudio que estamos tratando no es un problema de localización en si mismo. El objetivo es evaluar todas las posibles ubicaciones de la planta de biomasa desde el punto de vista de la aplicación del algoritmo del “camino más corto”, siendo el más extendido el desarrollado por E. W. Dijkstra (visto en el apartado 3.1.5). La aplicación de este algoritmo evita tener que calcular los cientos de miles de caminos que pueden generarse entre todos los orígenes y los destinos, identificando secuencialmente el “camino más corto”.

En la zona de actuación (comarca) se parte de la consideración que cualquier lugar candidato es válido para albergar la planta de biomasa, y será analizado en detalle en el proceso de optimización. Aplicando esta estrategia se pretende evaluar y calcular todas las combinaciones posibles entre las posibles ubicaciones para instalar una planta de biomasa (destinos) y todos los puntos de recogida de biomasa (orígenes). Se entiende por combinación la ruta o trayectoria existente entre un lugar candidato y un punto de aportación de biomasa, empleando para ello la red de transporte.

El empleo de la matriz de Origen-Destino tiene una ventaja y un inconveniente claramente destacables. La ventaja principal es que se obtienen los valores y datos estadísticos de cada uno de los lugares candidatos puesto que todos son evaluados, al contrario que en la aplicación de modelos de localización óptima, que únicamente se obtienen los óptimos. El mayor inconveniente es el tiempo de cálculo para resolver la matriz de distancias, es decir, la carga computacional es muy elevada como consecuencia del número de combinaciones a resolver si el área estudiada es muy extensa implicando esto un gran número de elementos para su resolución.

#### **Caso de estudio**

Resolviendo<sup>49</sup> la matriz de Origen-Destino con los datos de entrada mencionados para una única instalación, obtenemos los siguientes valores estadísticos del punto de localización óptimo con identificador 1039:

Lugares candidatos (Centros): 462

Puntos de aportación (Nodos): 1.756

Número total de combinaciones: 811.272

Distancia total recorrida: 29.115,3 km

Distancia total recorrida ponderada: 141.592 km

---

<sup>49</sup> En el Anexo III se describen detalladamente como resolver este tipo de problemas el SIG

Con estos valores y empleando la formulación para el cálculo de costes de biomasa (CBi) descrito en el capítulo 2 apartado 2.5 es posible obtener el coste por tonelada de biomasa para todos los lugares candidatos. Para ello debemos sustituir en la ecuación los valores de: número de viajes (multiplicado por dos, ida y vuelta) y la distancia total ponderada, siendo:

$$CB_i (\text{€}) = 127 * NV + 2.05 * \sum_i^n d = 1.569.725 \text{ €} \quad \text{Ec. 48}$$

$$CB(\text{€} / t) = \frac{1.569.725}{100.740} = 15,58 \text{ €} / t$$

Del mismo modo se obtienen los resultados para el resto de ubicaciones con la finalidad de tener una mayor diversidad de alternativas en la fase de toma de decisión. Los principales resultados alcanzados son:

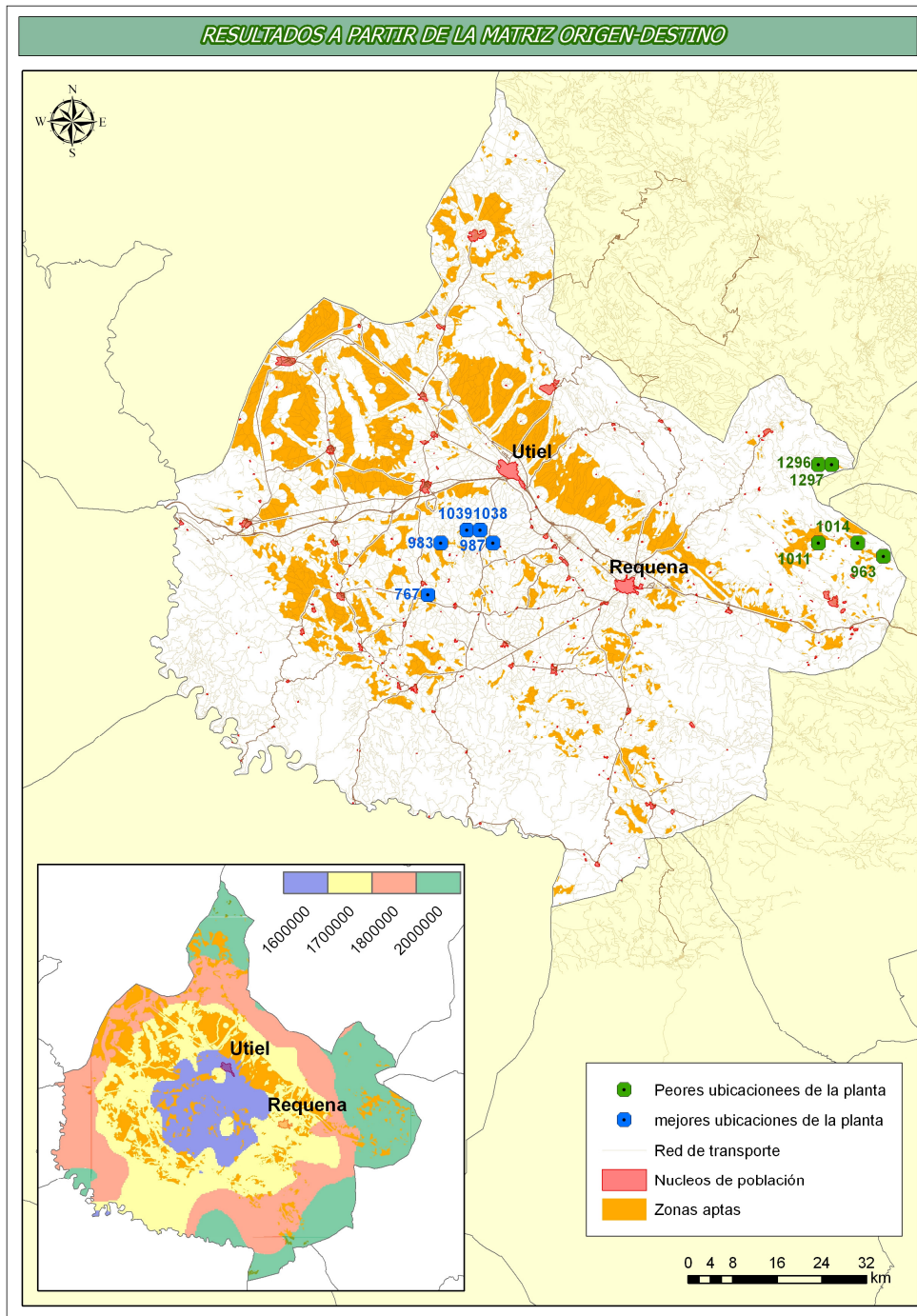
MEJORES UBICACIONES				
ID	DISTANCIA TOTAL	DISTANCIA TOTAL PONDERADA	DISTANCIA MEDIA PONDERADA (KM)	COSTE (€/T)
1039	29.115	141.592	10,2	15,58
1038	29.329	142.063	10,3	15,59
987	29.163	142.827	10,4	15,61
767	29.680	142.886	10,4	15,61
983	29.980	143.978	10,5	15,63

**Tabla 40. Resultados de las cinco mejores ubicaciones empleando la matriz Origen-Destino (calculado en Km.)**

PEORES UBICACIONES				
ID	DISTANCIA TOTAL	DISTANCIA TOTAL PONDERADA	DISTANCIA MEDIA PONDERADA (KM)	COSTE (€/T)
1297	64.367	388.389	27,9	20,60
1296	63.238	380.572	27,4	20,45
1014	55.854	337.261	24,3	19,56
1963	56.190	336.744	24,2	19,55
1011	55.050	332.804	23,9	19,47

**Tabla 41. Resultados de las cinco peores ubicaciones empleando la matriz Origen-Destino (calculado en Km.)**

Podemos concluir analizando la Tabla 40 y Tabla 41 que la reducción en el coste global entre elegir las ubicaciones óptimas o, en el peor de los casos, alguna de las consideradas como peores ubicaciones es de más de 500.000 euros (5 €/t respecto a 100.074 toneladas de biomasa), lo que supone más de un 30%.



**Figura 38. Representación de las cinco mejores y peores ubicaciones para la localización de una planta de biomasa a partir de la matriz Origen-Destino**



En la Figura 38 se muestran los resultados gráficos de las cinco mejores y peores ubicaciones. Vemos, al igual que en la Figura 28 y Figura 36 las mejores ubicaciones se agrupan en la zona centro de la comarca. Sin embargo, las ubicaciones que soportan mayor coste se localizan en el extremo este de la misma.

La imagen inferior izquierda de la figura 38 representa la distribución espacial del coste global (interpolación) empleando los 462 lugares candidatos de los cuales disponemos dicha información a partir de la resolución de la matriz O-D. Se desprende de la figura, como era de esperar por los resultados que venimos analizando con los anteriores modelos de localización, que la zona centro (color morado) es donde el coste de la biomasa es menor, concretamente entre 1.600.000 € y 1.700.000. El siguiente rango representado es el coloreado en amarillo estableciéndose entre 1.700.000€ y 1.800.000. El siguiente rango se encuentra entre 1.800.000 € y 2.000.000 coloreado en rosa, y por último, el área de color verde identifica las peores ubicaciones con costes superiores a 2.000.000 € y valores similares a los descritos en la Tabla 41

En la Figura 39 podemos observar la relación lineal entre el coste total obtenido a partir de la ecuación  $CB_i(\text{€})$  y la distancia en kilómetros necesaria en cada caso (ubicaciones candidatas) para recoger toda la biomasa de la comarca. Atendiendo a la distribución de los puntos que conforma la tendencia de la recta y a sus distribuciones la gran mayoría se concentran entre los 150.000 y 200.000 km en referencia a la distancia y entre 1.550.000 y 1.750.000 euros de coste.



**Figura 39. Relación entre el coste global de cada ubicación potencial y los kilómetros recorridos por cada una de ellas.**

#### 5.4.4. Comportamiento de las distancias y los costes en las diferentes estrategias planteadas

A continuación, se intentará mostrar y comparar de manera conjunta las diferentes magnitudes que nos brindan los resultados referidos a las localizaciones óptimas de cada una de las estrategias planteadas en base a los modelos de localización. Así pues, las distancias y los costes merecen especial mención en el estudio.

Uno de los parámetros de referencia son las **distancias totales recorridas** que directamente nos dan una idea de la magnitud espacial, permitiendo al mismo tiempo evaluar la eficiencia territorial según el modelo de localización aplicado. De este modo observamos en la Tabla 42 y Figura 40 que los modelos con jerarquías son lo que menos distancias recorren, y por lo tanto los que mayor eficiencia espacial registran. Sin embargo, el modelo p-mediano y el de máxima cobertura presentan resultados análogos, a pesar de que este último recorre una menor distancia debido a la biomasa no asignada por la restricción de la cobertura máxima a 30 km. Podríamos concluir, que todos los modelos aplicados que incluyen alcance espacial (restricción de distancia) mejoran la eficiencia del sistema, a expensas de desprestigiar una cantidad de biomasa, es decir una cierta cantidad de biomasa alrededor del 5%, que no será asignada a ningún centro.

MODELO	DISTANCIA TOTAL	DISTANCIA TOTAL PONDERADA	DISTANCIA MEDIA PONDERADA	DISTANCIA MÁS LARGA
p-mediano	58.348	283.444	14,07	35
p-mediano con jerarquía <sup>50</sup>	16.161	213.566	4,2	11,7
Máxima cobertura	57.116	281.196	14,1	29,83
Máxima cobertura con jerarquías <sup>51</sup>	26.912	243.879	5,8	5
Matriz O-D	58.230	283.184	10,2	27,9

Tabla 42. Comparación de las distancias (en km.) resultantes de los modelos aplicados

El segundo parámetro a analizar es la distancia media, cuyos valores más altos se registran en el modelo p-mediano alcanzando un valor de 14,7 km debido a que en este modelo no se han aplicado restricciones, y siendo ligeramente inferior en el de máxima cobertura. Destacar en referencia a estas distancias medias, tal y como vimos en la Tabla 32, la instalación de centros de transferencia produce un descenso de estas distancias hasta alcanzar el valor más bajo de 2,9 km con 16 centros. Como se apuntó anteriormente, estas distancias incitan a realizar las operaciones de recogida a granel.

<sup>50</sup> Los valores del p-mediano con jerarquías se refieren a la estructura óptima de 16 C.T, en la cual se ha de sumar el recorrido total a los 16 centros y añadirle el recorrido total a la planta.

<sup>51</sup> Los valores de máxima cobertura con jerarquías se refieren a la estructura idónea de 32 C.T.

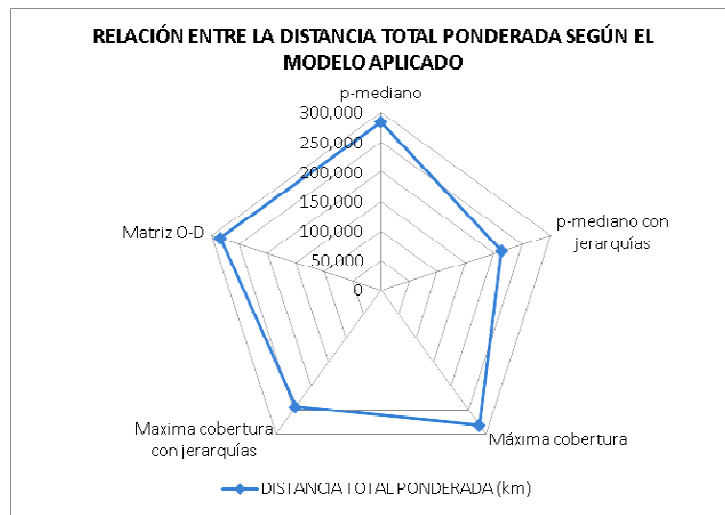


Figura 40. Comparación entre modelos respecto a las distancias totales ponderadas

Por último, la distancia máxima por trayecto también es un indicador muy importante junto con los dos anteriores, y refleja la inequidad territorial. En la comarca de Utiel-Requena el punto más alejado de biomasa respecto al óptimo en el modelo de p-mediano se encuentra a 35 km. Esta distancia empieza a disminuir paulatinamente en el momento que se instalan centros de transferencia, situándose en torno a 10km cuando superan 16 centros. Como podemos observar en la Tabla 42 las distancias máximas menores se dan en aquellos modelos con jerarquía y restricciones, donde el máximo recorrido es de 29,83 km.

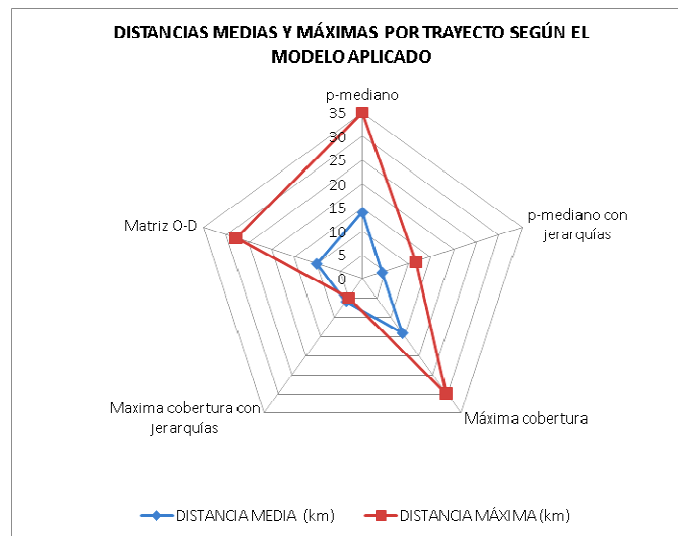


Figura 41. Comparación entre modelos respecto a las distancias medias y máximas

Del mismo modo que las distancias, **los costes unitarios y globales** han de ser analizados minuciosamente para concluir que modelo sería el que económica y logísticamente se adaptaría mejor a nuestro territorio. En la Tabla 43 se muestran los resultados óptimos de cada estructura logística.

MODELO	Nº DE CENTROS	COSTE (C1+C2)	COSTE INSTALACIÓN CENTROS	COSTE TOTAL (€)	COSTE (€/t)
p-mediano	-	-	-	1.569.991	15,6
p-mediano con jerarquía	16	1.676.900	96.000	1.771.900	17,7
Máxima cobertura	-	-	-	1.560.638	15,6
Máxima cobertura con jerarquías	32	1.592.240	192.000	1.784.240	18,6
Matriz O-D	-	-	-	1.569.725	15,6

**Tabla 43. Comparación de los costes (en euros) resultantes de los modelos aplicados**

A la vista de los resultados, podemos concluir que los costes globales a partir de modelos de localización para la identificación de ubicaciones óptimas sin jerarquías ni restricciones es mas económico, aunque en la práctica la accesibilidad de la maquinaria en parcelas pequeñas conllevaría la instalación de centros de transferencia. Si así fuera, la mejor opción sería la del p-mediano con jerarquías estableciendo 16 centros de transferencia, puesto que es la opción más económica y se recoge toda la biomasa para su producción de electricidad o calor. Por el contrario, en el caso de máxima cobertura con jerarquías se están teniendo pérdidas de toneladas de biomasa debido a la restricción de la distancia, concretamente, 5.728 t. es precisamente por este motivo por el cual se ha elegido en el modelo de máxima cobertura con jerarquías 32 centros, en lugar de 16, prescindiendo de 18.077 t, una cantidad considerable.

Matizar, que a los costes globales obtenidos de cada modelo hay que añadirle los costes analizados “a pie de campo” cuyas operaciones de gestión vendrían hechas por el propio agricultor, aumentando los costes en un 40-50% como hemos visto en el apartado 5.4.1.

### 5.5. CONCLUSIONES Y DISCUSIONES DEL CAPÍTULO

En este capítulo se han expuesto tres metodologías, que aunque con diferentes objetivos, íntimamente relacionadas entre sí, debido a la adecuada integración de los Sistemas de Información Geográfica en el ámbito de la biomasa con fines energéticos. Resumiendo, la idea general presentada en los tres apartados anteriores es la siguiente:

- Identificación y cuantificación de la biomasa de origen agrícola y forestal para cada una de las comarcas de las tres provincias seleccionadas: Lugo, Ciudad Real y Valencia. Además, en una segunda fase, se desarrollan estrategias para la optimización logística y el transporte con el fin de evaluar los costes, las distancias y los tiempos empleados en transportar la biomasa desde su punto de

origen a la planta (fase de recogida) y desde la planta a los potenciales consumidores (distribución), en el marco del proyecto BIODER.

- Determinación de un conjunto de soluciones (zonas aptas) mediante técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC) dentro del entorno de los SIG. Para ello se requiere de la consideración de variables (factores) englobados en aspectos logísticos, ambientales y socioeconómicos, de donde se derivan las alternativas posibles para la localización de una planta en un territorio.

- Aplicación de los modelos de localización basados en programación lineal en el ámbito de la optimización de los residuos de biomasa. El objetivo de optimizar las estrategias logísticas deriva en minimizar los costes de la biomasa e identificar la ubicación óptima de la planta y de los centros de transferencia, sobre los lugares candidatos preseleccionados a partir de la EMC

A continuación, detallaremos las conclusiones de cada uno de las tres aplicaciones junto con las discusiones que se derivan de las mismas.

### ***5.5.1. Conclusiones y discusiones de la metodología basada en SIG del proyecto BIODER***

1. La metodología utilizada en el estudio ha contribuido a la optimización en las estrategias de logística y transporte, incrementando la viabilidad en las aplicaciones de biomasa. Una adecuada gestión de la biomasa distribuida puede minimizar las distancias de transporte, los tiempos de recorrido y como consecuencia reducir costes. El desarrollo de la metodología y su aplicación se ha llevado a cabo mediante la utilización de Sistemas de Información Geográfica proporcionando una red de plantas de biomasa distribuidas por el área de estudio a nivel comarcal, y una evaluación económica de los costes de transporte.
2. En concreto, la metodología ha sido aplicada a tres provincias de España, siendo estas Lugo, Ciudad Real y Valencia debido a su diversidad en el tipo de cultivos tanto agrícolas como forestales, sumando un total de 24 comarcas. Para la localización de plantas de biomasa, se han evaluado e identificando las más adecuadas de acuerdo a criterios económicos, sociales y ambientales, en concreto, 13.100 ubicaciones potenciales en Ciudad Real, 3.947 en Lugo y 4.314 en Valencia.
3. De los resultados se desprende que la biomasa disponible en la provincia de Valencia alcanza la cifra de 626.586 t, siendo de origen agrícola 534.756 t y forestal 91.826 t. En el caso de la provincia de Lugo la biomasa disponible es de 429.366 t, siendo de origen agrícola 6.064 t y forestal 423.302 t. Por último en el caso de Ciudad real, la biomasa disponible asciende a 417.515 t, siendo de origen agrícola 388.295 t y forestal 28.920 t Se trata de una cantidades considerables de biomasa como fuente de energía renovables para la producción eléctrica, cogeneración o pelets a nivel local, teniendo en cuenta la procedencia de dicha biomasa. Observemos que en la

provincia de Valencia y Ciudad Real la mayor cantidad de biomasa proviene de cultivos agrícolas, contrariamente a lo que ocurre en Lugo, con lo que hará prever que las operaciones forestales pueden tener complicaciones adicionales para esta recogida y que la estacional es diferente.

4. La superficie total ocupada por especies agrícolas en la provincia de Valencia asciende a 388.824 ha, donde entre las especies predominantes se encuentran el almendro, el viñedo, el olivo, el mandarino, el naranjo, el arroz y la huerta junto con cultivos herbáceos. En la provincia de Ciudad Real la superficie total ocupada por especies agrícolas es de 414.182,04 ha, predominando el viñedo, el olivo, y los cultivos herbáceos ocupando éstos grandes superficies, y en menor medida el almendro y la huerta. Finalmente, en la provincia de Lugo la superficie total ocupada por especies agrícolas en la asciende a 6.645,42 ha, donde el viñedo y los cultivos herbáceos son las especies predominantes.
5. Una mención especial requieren las tierras de labor por el uso de posibles cultivos energéticos en dichas tierras, por ejemplo el cardo (15t/ha). En la provincia de Valencia, la superficie ocupada por tierras de labor es de 49.975 ha, pudiéndose obtener un total de 52.196 t de biomasa adicionales a partir de cultivos energéticos. Las tierras de labor en Ciudad Real alcanzan elevadas cifras, concretamente 611.348 ha, pudiéndose obtener un total de 687.767 t de biomasa adicionales a partir de cultivos energéticos. En la provincia de Lugo, la superficie ocupada por las tierras de labor también es una cantidad considerable, alcanzando 155.008 ha, pudiéndose obtener un total de 174.384 t de biomasa adicionales a partir de cultivos energéticos
6. A partir de las toneladas de biomasa agrícola, de la humedad de cada especie y de su poder calórico es posible conocer el potencial energético del área de estudio. En el caso de la provincia de Valencia la energía generada es de 4.547 GJ (108,6 tep), en el caso de Ciudad Real se llega a 4.489 GJ (107,25 tep) y en Lugo 113 GJ (2,3tep). La contribución de energética procedente de la biomasa disponible podría ser una aportación considerable de la energía primaria de cada provincia.
7. Respecto al apartado forestal, de los resultados obtenidos se desprende que Lugo es la provincia que por su mayor ocupación de suelo forestal, producirá una mayor cantidad de biomasa disponible. En la provincia de Valencia el 90,4% de la biomasa forestal disponible (83.000 t) corresponden al *Pinus Halepensis*. En Lugo, aproximadamente el 58% de biomasa disponible (245.000 t) es generada a partir del *Eucaliptus*, y en Ciudad Real las cerca de 20.600 t de *Populus Canadiense* suponen el 71,2%. Resaltar que estas especies han sido las predominantes, pero se han evaluado 17 especies forestales distintas, a partir del volumen con corteza, el número de pies y el estrato.
8. Observando los datos globales por provincias podemos comparar los costes de las operaciones de recogida y distribución de biomasa. En Valencia obtenemos un coste medio de 49,1 €/t, siendo el valor mínimo y máximo

de 30,4 y 78,7 €/t, respectivamente. En Lugo el coste medio es de 47,5 €/t, siendo el valor mínimo y máximo de 37,7 y 69,3 €/t, respectivamente. Y finalmente, en Ciudad Real obtenemos un coste medio 48,5€/t, siendo el valor mínimo y máximo de 24,2 y 84,4 €/t, respectivamente.

9. Estos lugares candidatos han de cumplir una serie de recomendaciones (sociales y medioambientales, principalmente) además de estar seleccionados a partir de una malla regular de 1km<sup>2</sup>. Tras el estudio, ha quedado constancia de que es una buena aproximación, tanto la dimensión de la misma (1km de lado cada cuadrado), como su aplicación. Ésta nos ayuda a tener un conocimiento general de que tipo de uso del suelo (cultivo, urbano, etc.) que contiene cada uno de los cuadrados que la conforman.
10. En la fase de distribución, los destinos pasan a ser los centroides de los municipios de cada comarca. Al igual que ocurría en la fase de recogida, esta es una aproximación ya que no se conoce de manera precisa la localización de los consumidores de dicha biomasa. Sin embargo, los consumidores potenciales resultantes de la segmentación de la demanda energética en el proyecto identificaban a cuatro sectores importantes: residencial, servicios, hostelería e industrial. De modo que, para conocer la estimación de la demanda potencial de biomasa (MWh/año) es necesario conocer el número de habitantes a nivel municipal. La comarca con mayor demanda potencial es L'horta (provincia de valencia) llegando a 1.948.928 GJ (541.368 MWh/año ó 46,5ktep/año) con 1.947.190 hab., y la de menor demanda es la comarca de Montes Sur (Ciudad-Real) con 15.584 GJ (4.328 MWh/año ó 371tep con una población de 13.105 hab.
11. Los resultados obtenidos están basados en la información actualmente disponible, pero la metodología permite su actualización con la periodicidad que se considere oportuna. Se utilizan los SIG para posibilitar esa actualización, a la vez que optimizar todos los aspectos logísticos implicados. Además, se pueden analizar escenarios futuros o hipotéticos, como los cambios sustanciales en la tipología de cultivos agrícolas. De modo que la principal conclusión que podemos extraer es la validez de la metodología basada en SIG en la evaluación de estrategias energéticas a medio y largo plazo.
12. Al obtener los resultados del análisis de la red, se observó que uno de los mayores condicionantes eran las vías de comunicación, es decir, los resultados dependían en gran medida de lo adecuadamente que estuviera comunicada la comarca, así como del tipo de vía por el que se circulara. En la mayoría de los casos, siempre y cuando la comarca tuviera una geometría y comunicación homogénea, las mejores ubicaciones estaban situadas en el centro.
13. Para obtener la biomasa teórica y disponible se han aplicado unos coeficientes de generación superficial de residuos (t/ha) que se asignan dependiendo del tipo de cultivo, de modo que el porcentaje de ocupación de cada especie es un dato fundamental. Además, para la obtención de la biomasa disponible se han de añadir los coeficientes de disponibilidad

comarcal y por especie, debido al uso de esta biomasa para fines no energéticos. Por lo cual, estos coeficientes varían según autores, aplicaciones y zonas de estudio, pero pudiendo ser un referente los que aquí se aplican para el marco mediterráneo.

14. La aproximación a la unidad mínima de información, establecida en  $1\text{km}^2$ , tanto para los orígenes (puntos de aportación de biomasa, como para los destinos (lugares candidatos, podría ser más afinada, es decir, a un nivel que podríamos denominar “a pie de campo” donde el agricultor gestiona sus residuos, para acercarse más a realidad. Esta estrategia se establecería fijando los centroides de cada parcela y conociendo las características del cultivo. Este procedimiento dificultaría en gran medida la carga computacional con la imposibilidad de obtener resultados directos en aquellas áreas de estudio de grandes extensiones, aunque sería una estrategia más realista.
15. Si se analiza la ecuación que evalúa los costes globales de la biomasa previa compactación  $FC_i$  (€/t), observamos que depende del número de viajes (trayectos) realizados y de la distancia recorrida para llevar al destino  $i$  toda la biomasa de los puntos origen  $j$ . El número de viajes es un dato que se obtiene a partir de fijar la “unidad de transporte” que, para un camión de carga mediana, se ha establecido en 10t de biomasa compactada por trayecto. Una de las deficiencias que se han encontrado en la fase de recogida es que determinados puntos de aportación de biomasa (orígenes) no alcanzan esa cifra, con lo cual el camión no llega a su carga máxima y sin embargo realiza el trayecto hasta el candidato (posible destino). De este modo, el número total de viajes calculados en la metodología será algo mayor que en la realidad, ya que el camión iría al punto más próximo de biomasa para completar su carga máxima.
16. Se ha de remarcar que el análisis no va enfocado a un estudio de viabilidad económica total, puesto que no se han considerado los costes de instalación de la planta de biomasa propiamente dicha, así como el coste de adquisición de camiones (compra o alquiler). Se ha pretendido dar al análisis un enfoque logístico en función de la demanda (biomasa) y la distancia, que en definitiva es uno de los mayores costes.
17. Los factores de localización son los elementos que han determinado las restricciones sociales y ambientales en el estudio, teniendo en cuenta diversos criterios naturales y artificiales, para evaluar la localización de la planta. En nuestro caso estos factores únicamente ofrecen dos posibilidades respecto al lugar candidato: si es posible la ubicación o no lo es, dependiendo de la coincidencia con las zonas de influencia generadas. La función principal de estos factores es doble, por un lado, establecer un área de seguridad a los elementos planteados, y por el otro, limitar el número de lugares candidatos haciendo menos compleja la resolución del problema computacionalmente.
18. En este análisis cualquier lugar candidato será analizado en detalle después de haberse calculado todas las combinaciones posibles y los resultados de las mismas entre los orígenes y los destinos. Esta es una de las principales



diferencias respecto a emplear modelos de localización debido a que en los modelos planteados mediante programación lineal, se busca el óptimo, es decir, maximizar o minimizar una función objetivo, y por tanto, conocer los resultados de los óptimos. Sin embargo, mediante esta estrategia, conocemos los valores de todos y cada uno de los lugares candidatos, teniendo un gran abanico de alternativas de donde elegir.

19. En la fase de distribución, el transporte de la biomasa hasta el consumidor se realiza en forma de pelets. El coste de distribución es considerablemente menor que el coste de recogida, debido al aumento de la capacidad de carga del camión, a la reducción de operaciones de carga y descarga, de compactación y otras, llegando a ser cinco veces inferior que el de recogida. Finalmente, el coste total de la biomasa se obtiene como suma de ambos, escogiendo por un criterio económico (el de menor coste) las ubicaciones óptimas.
20. Respecto a la herramienta empleada para llevar a cabo el análisis de redes incluida en la aplicación cartográfica, ha sido posible la integración de un elevado número de elementos implicados en dicho análisis tales como: vías de transporte, puntos de aportación de biomasa, ubicaciones potenciales, unidad de transporte, accesibilidad a las parcelas, centro del municipio, etc., además de características particulares de dichos elementos, simulando en cierta medida las fases de recogida y distribución de la biomasa. Un inconveniente de la misma es que tiene funcionalidades limitadas que se superaron con la automatización de algunos procesos, y además los algoritmos que emplea están cerrados, sin la posibilidad de elección. Por otro lado, es posible desarrollar una aplicación personalizada y más realista en el propio módulo.
21. Cabe resalta la implementación de la estructura Desktop Grid (Plataforma BOINC) adaptada al sistema de información geográfica ArcGis, para incrementar la capacidad de proceso de datos cartográficos y estadísticos. Los principales resultados estadísticos han sido calculados para todas las ubicaciones potenciales (en la fase de recogida y distribución) a partir de modelos espaciales y posteriormente resueltos con la aplicación Desktop Grid. De modo que, se optó por automatizar los procesos correspondientes a la identificación y cuantificación de la biomasa, así como la fase de la optimización de la logística y el transporte (Análisis de redes) para dar solución al problema computacional fruto del elevado volumen de datos y de recursos necesarios para su procesamiento.

#### ***5.5.2. Conclusiones y discusiones del grado de adecuación de una planta de biomasa mediante técnicas de EMC-SIG***

1. Ha quedado patente que la integración de métodos de EMC y los SIG genera una potente herramienta para abordar problemas de planificación territorial y, en nuestro caso concreto energética, por tratarse de la localización de una planta de biomasa. Esta herramienta nos permite llevar a cabo procesos de análisis espacial que nos sirven como base en la

localización de instalaciones y en la gestión de recursos. Así, con la combinación de EMC y SIG podemos dar respuesta a diversas inquietudes: por un lado, aportar conocimiento territorial a la planificación energética y por otro, aportar las herramientas necesarias para incluir ese conocimiento en el desarrollo de un proyecto con el objetivo de ayudar a la toma de decisiones.

2. La elección de los criterios y factores de evaluación (criterios ponderados), va a incidir de forma notable en todo proceso de evaluación y los resultados quedarán afectados por la exclusión o inclusión de algunos criterios. Para evaluar los criterios se ha elegido una escala de valores comprendida entre 1 y 9 (igual importancia – extremadamente fuerte), desarrollando las matrices de comparación por pares de Saaty para cada factor y el procedimiento de las jerarquías analíticas. En total, se han evaluado 13 factores en el segundo nivel, concretamente: 5 factores ambientales, 6 factores económicos y 2 factores sociales.
3. Como se indicó anteriormente, la asignación del peso de los factores está basada en un conjunto de juicios de valor y, por lo tanto poseen un carácter subjetivo susceptible de ser reconsiderado y debatible. En este estudio, estos juicios de valor se fundamentan en la revisión de la bibliografía y de otros estudios previos similares, de tal forma que los factores ambientales fueron los de mayor importancia, seguidos por los factores económicos y, por último los sociales. Respecto a los factores del segundo nivel, de entre los factores medioambientales fueron considerados los tipos de cultivos y la cobertura vegetal natural los más importantes, en lo referente a factores económicos, el coste de transporte, la pendiente y la biomasa, y en lo social, resalta la población afectada por la instalación, frente al impacto visual.
4. En relación con los factores utilizados en el estudio haremos una breve descripción de los datos más relevantes. En lo referente a los factores ambientales:
  - En el primer caso se encuentran las unidades litológicas donde destacan las dos clases correspondientes a arcillas arenosas y plásticas, margas y yesíferas alcanzan el 0,63, convirtiéndose en el tipo de suelo más idóneo para dicha instalación.
  - Los tipos de cultivos más vulnerables y por tanto mayormente protegido es el regadío y los árboles frutales, con un 0,7 entre ambos, e igualmente en el caso de cobertura vegetal natural cuyas especies poseen un carácter conservativo y protegido son las coníferas, frondosas y otras especies boscosas, sumando un 0,87 entre ambas clases. Cabe destacar la extensa superficie de viñedos en esta comarca, y siendo considerados como uso protegido limita el área de considerada como zonas aptas, sobre todo en la zona centro.
  - Respecto a la fisiografía del terreno, las clases correspondientes a zonas planas y con suave o moderada ondulación son las que acaparan el 0,77 del peso, siendo las idóneas para la localización de la instalación.

- Por último, el factor de la geomorfología es el que más repartido se encuentra, sin considerar aquellas clases con riesgos de deslizamientos elevados y erosión alta y muy alta.
5. En lo que concierne a los factores económicos:
- Las pendientes inferiores a  $< 10\%$  no provocan problemas de tipo geomorfológico, y el terreno se puede dedicar a los usos más intensivos, de modo que el peso entre ambas clases que lo cumplen alcanzan el 0,73.
  - El factor de accesibilidad a las vías de comunicación más valorado coincide con distancias  $< 1\text{km}$  en autopistas y carreteras, y  $< 0,5\text{ km}$  en el caso de caminos y sendas, correspondiendo esta clase a accesibilidad alta.
  - El factor que representa la biomasa del área de estudio se divide en cuatro clases, siendo las dos últimas con una cantidad de biomasa  $> 200\text{ t/ha}$  las de mayor peso, alcanzado un 0,85.
  - Junto a este, el coste de transporte también es un factor relevante, siendo los valores pertenecientes a las dos primeras clases correspondiendo a costes  $< 26\text{ t/ha}$ , los de mayor peso.
  - El factor de la demanda potencial ha sido calculado a partir del consumo de energía primaria municipal y el número de habitantes, diferenciando entre sector industrial y no industrial, alcanzando la cifra de 111,38 ktep de consumo energético en la comarca.
  - Y por último, el factor del desarrollo económico se ha determinado en función de la superficie ocupada por suelo industrial, la densidad de población y la superficie del municipio, asignando los valores más altos a las áreas más desarrolladas (estableciendo un indicador dividido en tres clases).
6. Finalmente los factores sociales, se han dividido en dos: la población afectada y el impacto visual:
- Respecto al factor de la población afectada se han establecido distancias de seguridad a dicho núcleo y se ha considerado la población de cada término municipal. A partir de estos valores, el mayor peso ha recaído en la clase correspondiente a población no afectada con una distancia de seguridad  $> 3\text{ km}$  y áreas residenciales baja, media o alta densidad, con prácticamente un 0,45.
  - Y, el factor de impacto visual, aún siendo el de menor importancia de los 13 descritos, tiene su relevancia paisajística muy localizado que puede derivar en conflictos sociales dependiendo de su ubicación final. Por este motivo, las zonas no visibles, es decir, desde donde no se ve la instalación se pondera con un 0,68.
7. Cabe destacar que existen áreas en el territorio con características especiales, ya sean de origen natural o artificiales sobre los cuales se ha de adoptar una política conservativa y proteccionista, en muchos casos aplicando la legislación vigente. En el estudio estos son los limitantes y se han considerado: red hidrográfica y masas de agua, patrimonio histórico, espacios naturales, flora y fauna, áreas inundables, aeropuertos y helipuertos, ferrocarril, vías pecuarias, otras instalaciones e infraestructuras, pendiente, núcleos de población, tejido industrial y vías de comunicación. Además, la Regulación de los usos del suelo identifica las

áreas donde será posible la localización de este tipo de instalaciones, concretamente el suelo No Urbanizable Común, a partir de la cartografía de calificación y clasificación del suelo vigente de la Comunidad Valenciana.

8. En nuestro estudio se han empleado como métodos de EMC la sumatoria lineal ponderada y el análisis del punto ideal, que aunque ambas son compensatorias poseen diferente naturaleza matemática. La selección de estos métodos se debe a dos motivos. El primero de ellos es porque si utilizamos pesos para la ponderación de los criterios con el objetivo de establecer un orden entre las alternativas de selección, la bibliografía nos incita a emplear estos métodos. Y el segundo, ambos métodos son fácilmente integrables en un SIG, es decir, matemáticamente no generan ninguna complicación.
9. Una característica a destacar del método del punto ideal respecto a los métodos aditivos, como por ejemplo la Sumatoria Lineal, es que los métodos de Análisis del punto ideal denotan una menor compensación, puesto que en la sumatoria lineal los valores de cada alternativa se producen por adición, lo que puede enmascarar valores bajos en varios criterios frente a un valor alto en uno solo. Esta cuestión no queda reflejada en los resultados puesto que son prácticamente equiparables.
10. Respecto a los resultados cuantitativos a partir del método de la sumatoria lineal ponderada destacamos que de la totalidad de la superficie de la comarca de aproximadamente 1.835 km<sup>2</sup>, únicamente 418 km<sup>2</sup> del rango completo de adecuación son susceptibles de albergar una planta de biomasa, siendo los que ocupa mayor extensión las zonas intermedias de adecuación. Solo 28,1 km<sup>2</sup> corresponden a zonas altamente adecuadas para la instalación de la planta.
11. Las áreas más adecuadas se encuentran fundamentalmente al noroeste de Utiel, en las cercanías de Camporrobles, y un último grupo más disperso en la zona centro de la comarca. Por otro lado, las zonas menos adecuadas se sitúan en la zona sudoeste de la comarca, en las cercanías de las localidades de Venta del Moro y Casa de Moya.
12. Por último, podemos observar los 336 km<sup>2</sup> de la suma de los niveles intermedios (coloreados en naranja y rojo) ofreciendo un amplio abanico de ubicaciones por extenderse de forma homogénea por toda la superficie susceptible de albergar una planta de biomasa. Se destaca una franja extensa en estos niveles en la zona norte de las localidades más importantes, Requena, Utiel y Caudete de las Fuentes, limitando ésta con la masa forestal situada al norte de la comarca.
13. El análisis de sensibilidad proporciona información sobre los trece factores y cuales de ellos los principales responsables de las variaciones en los resultados del modelo. El análisis se ha llevado a cabo aplicando los métodos Sobol' y Fast extendido pertenecientes a métodos globales basados en la varianza. De los resultados se vislumbra, que los factores más importantes son: la fisiografía (0,36), los tipos de cultivos (0,20), la vegetación (0,16), la demanda (0,09) capturando el 81% de la varianza. La

conclusión que se desprende, y que habría que llevar a la práctica en cualquier problema, es que estos cuatro factores siendo los que más influencia tienen sobre los resultados deberían tener una buena calidad en sus datos de partida. Del mismo modo, los factores: pendiente, biomasa y coste de transporte en este modelo tienen una relevancia muy significativa, quedando nublada al asignar unos pesos elevados en el nivel 1 a los factores ambientales. Este hecho indica que los pesos de esos tres factores deberían ser más elevados para que así se reflejara en los resultados. Respecto a la variación en los pesos destacamos el peso del transporte, de la vegetación y de la fisiografía que aparecen con una importancia considerable en la variación de los resultados, indicando que éstos tres son altamente sensibles y por lo tanto muy influyentes en el modelo.

### ***5.5.3. Conclusiones y discusiones de la aplicación de modelos de localización basados en programación lineal en la ubicación óptima de plantas de biomasa***

1. La metodología presentada se ha centrado en la localización óptima de plantas de biomasa y de centros de transferencia sobre la comarca de Utiel-Requena, aplicando modelos de localización basados en programación lineal entera. El objetivo principal ha sido identificar la mejor solución al problema planteado desde distintos puntos de vista y sirva como una herramienta de apoyo a la toma de decisiones espaciales válida en procesos de planificación
2. En el estudio se han aplicado varios tipos de modelos: p-mediano, el problema de cobertura máxima, y una tercera estrategia que es la matriz de O-D. Estos fueron elegidos por dos motivos. Por un lado, minimizar la distancia e intentar que la nueva instalación esté ubicada lo más cerca posible de los puntos de demanda (biomasa) para minimizar los costes. Y por otro, al minimizar las distancias al mismo tiempo también se están minimizando los efectos adversos y molestos que provoca dicha instalación en la población cercana. Normalmente, en nuestro planteamiento, se utilizarían modelos como el Maximin o el Maxisum para localizar estas instalaciones tan lejos como fuera posible de la población, pero el coste económico aumentaría considerablemente. Por ello, para respetar el medioambiente, no provocar malestar ni perjuicios a la población y cumplir con la legislación vigente, únicamente podrán ser lugares candidatos una preselección de ubicaciones que coincidirán con las zonas aptas resultado de la EMC.
3. Los costes de recogida y transporte son una parte muy importantes del estudio de viabilidad y se ha observado que en todos los casos, incluso en distancias inferiores a los 30 km, la compactación previa mediante empacado reduce los costes en casi un 20%. Utilizando este sistema de compactación se puede observar que el coste de transporte en la comarca de Utiel-Requena, está en el rango de 15 – 21 €/t.
4. La materialización de estas estrategias logísticas han sido realizadas mediante el software ArcInfo Workstation en su versión 9.2 empleando

para ello el modulo Network Analysis el cual tiene implementados diversos modelos de localización basados en el p-mediano y en coberturas, entre otros. En concreto el número de lugares candidatos para albergar la planta de biomasa asciende a 462 ubicadas, obtenidas a partir de la obtención de las zonas de aptitud calculadas mediante EMC. La demanda quedará representada por los puntos de aportación de la biomasa compactada a partir de 1.760 puntos.

5. Respecto a los algoritmos implementados en la aplicación, para el cálculo del “camino más corto” se utiliza el algoritmo de Dijkstra para la resolución de distancias a través de la red de transporte que, aunque emplea más recursos informáticos es mucho más realista que la distancia euclídea o Manhattan, sobre todo en este tipo de problemas donde las vías de comunicación juegan un papel decisor. Por otro lado, dado el volumen de datos empleados se hace necesario la utilización de un heurístico, eligiendo el conocido Teitzbart para la resolución del problema.
6. En el primer caso de estudio ha sido aplicado el modelo p-mediano (o minisum) con demanda ponderada con el objetivo de encontrar las localizaciones óptimas minimizando las distancias totales y, por lo tanto los costes. De la resolución de dicho problema se desprende que desde la ubicación óptima se recorrerán 283.444 km, realizando una distancia media en cada viaje de 16,5 km, recogiendo 100.745 t de biomasa repartidas entre los 1.760 puntos (orígenes), y cuyo punto de biomasa más distante se encuentra a 35 km. Aplicando la formulación para el cálculo de costes totales obtenemos que para transportar toda la biomasa desde sus orígenes a su destino óptimo (unidad de transporte, 10t) serán necesarios 1.569.991 €, o en coste unitario, 15,5 €/t. En la representación gráfica de los resultados se puede apreciar que la localización óptima (las cinco mejores) están situadas al sur de la población de Utiel, coincidiendo con las áreas de la zona de estudio donde mayor densidad de biomasa se genera (> 300 t/ha), una considerable cercanía a la autovía mediante una buena comunicación por carreteras nacionales y comarcales rodeando dicha localización.
7. Se plantea el modelo p-mediano con estructura jerárquica, donde en el nivel más bajo se encuentran las operaciones “a pie de campo”, en el nivel intermedio aparecen los centros de transferencia, y por último en el nivel superior, la planta de biomasa. Esta estrategia se centra principalmente en conocer como influyen en el coste total la instalación de centros de transferencia, y como se aprecia en los resultados éstos son un 11% más elevados debido fundamentalmente a la infraestructura que los centros de transferencia conllevan. Además, se concluye también que aumentar el número de centros de transferencia hace disminuir los costes globales hasta alcanzar los 16 centros, a partir de este momento los costes comienzan a aumentar de nuevo al aumentar el número de centros de transferencia, de modo que es en ese punto donde se llega al óptimo. Por último, en esta estrategia también se comparan los costes globales entre biomasa transportada a granel y con previa compactación, deduciendo como era de

esperar, que son un 18,6% más elevados a granel, pero facilitando considerablemente la accesibilidad.

8. Respecto a la estrategia establecida según el modelo de máxima cobertura, el objetivo es maximizar la demanda a cubrir (biomasa) a partir de un cierto número de instalaciones elegidas de entre un conjunto de lugares candidatos y dentro de una distancia inferior a 30km. Los resultados generales de dicho problema determinan que desde la ubicación óptima se recorrerán 281.1196 km, realizando una distancia media en cada viaje de 14,1 km, recogiendo 100.019 t de biomasa repartidas entre los 1.730 puntos (orígenes), y cuyo punto de biomasa más distante se encuentra a 29,8 km. Aplicando la formulación para el cálculo de costes totales obtenemos que para transportar toda la biomasa desde sus orígenes a su destino óptimo (unidad de transporte, 10t) serán necesarios 1.560.637 €, o en coste unitario, 15,5 €/t. Esta disminución en el coste es debido a los puntos de biomasa que no han sido asignados por superar el umbral de la distancia, asciende a 548,5 t. En la representación gráfica de los resultados se puede apreciar que cuatro de las cinco mejores ubicaciones se localizan en la zona centro de la comarca y una de ellas al nordeste de Requena, precisamente donde se encuentran las plantas de biomasa existentes en la actualidad.
9. Además, para la determinación de centros de transferencia con el modelo de máxima cobertura se ha fijado un radio máximo de 5km. La conclusión que se desprende de los valores alcanzados es que con 32 centros de almacenamiento se recogería prácticamente la totalidad de la biomasa, más del 95%, recorriendo una distancia ponderada de aproximadamente 53.827 km. De este modo, las distancias recorridas descienden considerablemente, sin embargo, no se aprecia prácticamente pérdida de residuos, es decir, económicamente sería mas ventajoso establecer esta estrategia de cobertura máxima. Por otra parte, aunque implantáramos más centros de transferencia no se recogería en ningún caso la totalidad de la biomasa, por el cumplimiento de los 5km de radio establecidos. Sin embargo, hay que tener en cuenta el coste de los 32 centros de transferencia, ascendiendo a 192.000 €.
10. La última estrategia planteada es resolver el caso de estudio mediante la aplicación de una matriz origen-destino, que a pesar de no ser un problema de localización en si mismo aporta información trascendental al estudio. El objetivo es evaluar todas las posibles combinaciones entre los orígenes y los destinos desde el punto de vista del algoritmo del “camino más corto”. Los resultados más relevantes de esta estrategia se basan en la considerable reducción en el coste global entre elegir las ubicaciones óptimas o no elegir las, pudiendo alcanzarse una diferencia de más de 500.000€ (5 €/t respecto a 100.074 toneladas de biomasa), lo que supone más de un 30%.
11. En la practica, el transporte a granel se hace logísticamente necesario debido al reducido tamaño de las parcelas agrícolas y, la aproximación a 1km<sup>2</sup> como mínima unidad de gestión lleva consigo la omisión de unos costes considerables “a pie de campo”. Es por ello que se realizó el estudio minucioso en una de las áreas de gestión mínima, desprendiéndose

que se realizan 43,8 km adicionales para gestionar 55,6 t de biomasa. Puesto que la comarca queda cubierta por 1.760 de ellas, se alcanza un coste adicional de 822.713 €. Este coste deberá ser añadido en todas las estrategias logísticas planteadas, aumentando así el coste global entre un 40-50%.

12. En lo que se refiere a la comparativa entre distancias obtenidas en los resultados, referidas a las localizaciones óptimas, de cada una de las estrategias planteadas en base a los modelos de localización, podemos concluir que los modelos con jerarquías son lo que recorren menores distancias totales para recoger la biomasa, y por lo tanto los que mayor eficiencia espacial registran. Sin embargo, el modelo p-mediano y el de máxima cobertura presentan resultados análogos, a pesar de que este último recorre una menor distancia debido a la biomasa no asignada por la restricción de la cobertura máxima a 30 km. Podríamos concluir, que todos los modelos aplicados que incluyen alcance espacial (restricción de distancia) mejoran la eficiencia del sistema, a expensas de despreñar una cantidad de biomasa, es decir, alrededor del 5%, que no será asignada a ningún centro.
13. El segundo parámetro a analizar es la distancia media, cuyos valores más altos se registran en el modelo p-mediano alcanzando un valor de 14,7 km debido a que en este modelo no se han aplicado restricciones, y siendo ligeramente inferior en el de máxima cobertura. Por otra parte, la instalación de centros de transferencia produce un descenso de estas distancias hasta alcanzar el valor más bajo de 2,9 km con 16 centros. Por último, la distancia máxima por trayecto también es un indicador muy importante junto con los dos anteriores, y refleja la inequidad territorial. En la comarca de Utiel-Requena el punto más alejado de biomasa respecto al óptimo en el modelo de p-mediano se encuentra a 35 km. En los resultados podemos apreciar, además, que las distancias más largas se reducen considerablemente según van aumentándose el número de centros de transferencia. Esto nos lleva a pensar que cuando la media de las distancias se encuentra en el rango de 2-3 km es logísticamente más adecuado transportar la biomasa a granel hasta un centro de transferencia y luego hasta la planta. Las menores distancias máximas se dan en aquellos modelos con jerarquía y restricciones, donde el máximo recorrido es de 29,83 km.
14. Respecto a los costes globales y unitarios tras aplicar los modelos planteados, podemos sacar las principales conclusiones. La búsqueda de la solución de la ubicación óptima absoluta es similar tanto aplicando el p-mediano, el de máxima cobertura como la estrategia matriz O-D, refiriéndonos tanto a la localización geográfica como al ámbito económico (aproximadamente 1.560.000 €, o coste unitario, 15,5€/t). Al analizar los resultados estableciendo centros de transferencia el coste global aumenta un 11% respecto al anterior. Sin embargo, el establecer estos centros facilita y posteriormente trasladar la biomasa a la planta es una estrategia logística que se realiza en la práctica. Por último, debemos mencionar, que transportar la biomasa a granel (con centros de transferencia) supone un sobrecoste del 18,6% respecto al anterior (es decir 30% más a granel que



compactada). En base a este análisis, podemos concluir que los costes más económicos se obtienen a partir de modelos de localización con búsqueda de óptimo absoluto.

15. Se ha de remarcar que el análisis de costes a partir de los modelos de localización no constituyen un estudio de viabilidad económica total, puesto que no se han considerado los costes de inversión respecto a la planta y flota de maquinaria (compactadoras, camiones, etc). El análisis logístico se lleva a cabo en función de la demanda (biomasa) y la distancia, que en definitiva representa el mayor coste. Estableceremos que el valor de venta de la biomasa en pelets es de 180€/t, si en Requena se están gestionando 100.740 t de biomasa siendo aprovechables el 75% de esta cantidad debido al porcentaje de humedad, obtenemos unos beneficios de aproximadamente 13.500.000 millones de euros anuales.



---

## **CAPÍTULO 6.**

### **CONCLUSIONES GENERALES**

---

*En este capítulo se recopilan y se resumen las conclusiones generales del presente trabajo, organizadas en cuatro apartados, siendo éstos:*

- 1) Conclusiones de la metodología integral desarrollada para optimizar el aprovechamiento energético de los recursos biomásicos,*
- 2) Conclusiones de las técnicas de evaluación multicriterio en entornos SIG para establecer el grado de adecuación de una planta de biomasa,*
- 3) Conclusiones de las estrategias logísticas empleando modelos de localización basados en programación lineal en entornos SIG, y*
- 4) Conclusiones sobre la integración de los SIG en el ámbito energético y comparativa de las metodologías desarrolladas.*



A continuación se exponen las principales conclusiones fruto de la investigación llevada a cabo en la presente tesis doctoral.

Respecto a la **metodología integral** desarrollada para optimizar el aprovechamiento energético de los recursos biomásicos destacamos las siguientes ideas:

1. La metodología desarrollada en el estudio ha contribuido a la optimización de estrategias de logística y transporte, incrementando la viabilidad de las aplicaciones de biomasa. Una adecuada gestión de la biomasa distribuida puede minimizar las distancias de transporte, los tiempos de recorrido y como consecuencia reducir costes.
2. El desarrollo de la metodología y su aplicación se ha llevado a cabo mediante la utilización de Sistemas de Información Geográfica, destacando la importancia y la integración de éstos como herramienta para fusionar el conocimiento geográfico y el ámbito energético referido a los recursos biomásicos, sobre su distribución espacial, tipología, caracterización, producción energética y costes.

Respecto a la aplicación metodológica de las **técnicas de evaluación multicriterio** en entornos SIG para establecer el grado de adecuación de una planta de biomasa en un territorio, destacamos las siguientes ideas:

1. La integración de métodos de EMC y los SIG genera una potente herramienta para abordar problemas de planificación territorial, incluyendo la vertiente energética. La combinación de técnicas EMC-SIG han permitido dar respuesta a diversas inquietudes: por un lado, aportar conocimiento territorial a la planificación energética y por otro, aportar las herramientas necesarias para incluir ese conocimiento en el desarrollo del estudio con el objetivo de ayudar a la toma de decisiones.
2. La planificación energética implica una intervención en el territorio y una interacción con los sistemas medioambiental, económico y social. Es por ello que, la planificación energética ha de estar necesariamente vinculada a la ordenación del territorio para garantizar un desarrollo sostenible. Esto hace necesario el análisis y la aplicación de las principales variables involucradas en la localización de una planta de biomasa, con la finalidad de establecer el grado de adecuación en un territorio para albergar dicha instalación.

Respecto a la aplicación de estrategias logísticas empleando **modelos de localización** basados en programación lineal en entornos SIG, para optimizar la ubicación de una planta de biomasa, destacamos las siguientes ideas:

1. La metodología presentada ha contribuido en la optimización para la ubicación de plantas de biomasa y centros de transferencia en un territorio, haciéndose uso de modelos de localización basados en programación lineal entera. La aplicación de esta metodología ha identificado la mejor solución al problema planteado desde distintos puntos de vista, además de

convertirse en una herramienta de apoyo a la toma de decisiones espaciales válida en procesos de planificación.

2. En el estudio se han aplicado varios tipos de modelos: p-mediano, el problema de cobertura máxima, y una tercera estrategia que es la matriz de O-D, con la finalidad de minimizar los costes de la planta de biomasa. Además, se han tenido en cuenta otros criterios relacionados con el respeto al medioambiente y el cumplimiento de la legislación vigente, seleccionándose únicamente como lugares candidatos aquéllos que coinciden con las zonas aptas resultado de la EMC.
3. Respecto a la elección del método más idóneo a aplicar, a partir de los resultados obtenidos, se concluye que los modelos de localización para la identificación de ubicaciones óptimas sin jerarquías ni restricciones son los más económicos (un 11%), aunque en la práctica la accesibilidad de la maquinaria en parcelas pequeñas conllevaría la instalación de centros de transferencia. Si así fuera, la mejor opción sería la del p-mediano con jerarquías, siendo ésta la opción más económica y recogiendo toda la biomasa para su producción de electricidad o calor. Podríamos concluir afirmando que todos los modelos aplicados que incluyen alcance espacial (restricción de distancia) mejoran la eficiencia del sistema, a expensas de despreñar una cantidad de biomasa, es decir, alrededor del 5%, que no será asignada a ningún centro.

Respecto a la integración de los **SIG** y las **metodologías desarrolladas** en las que se aplican, se aportan las siguientes conclusiones:

1. La integración de los SIG, no sólo como una herramienta de análisis sino también a nivel de investigación y planificación energética, ha quedado patente a lo largo de este trabajo. Si es cierto que los SIG todavía poseen deficiencias, éstas pueden ser subsanadas en muchos casos a partir de la programación de aplicaciones personalizadas, elevando su potencial en los estudios relacionados con fuentes de energías renovables por su íntima relación y dependencia con la variable geográfica.
2. Las aplicaciones que se han estudiado, extendiéndose también a un elevado número de casos prácticos, se enmarcan en alguno de las siguientes cuestiones: la evaluación de recursos regionales y/o locales, la localización de emplazamientos para instalaciones energéticas y los estudios de viabilidad ambiental (impacto ambiental o grado de adecuación en un territorio), económica y social. Es por ello, que en esta investigación para conseguir una integración más efectiva, se han considerado estos tres ejes junto con la ordenación territorial y energética.
3. Los SIG se han mostrado en este estudio como una importante herramienta tecnológica para resolver diversas cuestiones espaciales de relevancia geográfica en el área de la biomasa, tales como: la cuantificación, localización y caracterización del recurso en cuanto a su tipología, la disponibilidad y distribución, la localización óptima de plantas de biomasa y centros de transferencia. Con ello, los SIG facilitan la posibilidad de dar

una respuesta a la problemática planteada en primera aproximación en la toma de decisiones.

4. Así mismo, la potencia de cálculo de los SIG permite modelizar y resolver el problema territorial propuesto introduciendo las variables consideradas en el estudio, siendo posible el planteamiento de diferentes escenarios energéticos. Es por esta razón que la combinación en un entorno SIG de procesos de análisis espacial con otras técnicas, algoritmos, y diversas fuentes de información (geográficas o no) propicia el desarrollo de metodologías integrales como las aquí descritas.
5. Por otra parte, y refiriéndonos a las metodologías desarrolladas hemos de puntualizar diversas cuestiones.
  - La primera metodología en el marco del proyecto “BIODER” es la única de las tres que evalúa los recursos biomásicos regionales y, además, la fase de optimización logística se aplica tanto a la recogida como a la distribución. Por ello, esta metodología es considerada como integral. Algunos datos obtenidos en ésta, son lo que nutren los dos planteamientos siguientes.
  - En el caso de la segunda metodología, basa su fundamento en identificar las zonas adecuadas (áreas continuas) para la instalación de plantas de biomasa. Por tanto, no optimiza el resultado sino que se comporta como un DSS (*Decision Support System*), procedimiento para apoyar la toma de decisiones.
  - Por último, la aplicación de los modelos de localización para ubicar plantas de biomasa y centros de transferencia identifica la solución óptima, además de aportar valores estadísticos relevantes para el cálculo de los costes globales. Estas estrategias emplean datos discretos para su resolución, es decir, tanto los orígenes como los destinos son elementos puntuales.

Resumiendo, dependiendo del objetivo planteado deberá decidirse que metodología es la más adecuada debido a que cada una de ellas ofrece resultados distintos tras su desarrollo y aplicación, y aún siendo comparables entre sí se ha de tener en cuenta que: los datos empleados son diferentes y el grado de especialización necesario por el planificador para cada una de ellas ha de ser el adecuado para llevarla a cabo.





---

**CAPÍTULO 7.**

**DIVULGACIÓN DEL CONOCIMIENTO: ARTÍCULOS Y  
CONGRESOS**

---



Se presentan, fruto de los estudios llevados a cabo en el Instituto de Ingeniería Energética en colaboración con otros organismos, las publicaciones en la revista de ámbito científico realizadas por la presente autora.

▪ **Renewable Energy (Elsevier). Vol. 34, pp 555-565 (2009)**

*“Methodology based on Geographical Information Systems (GIS) for biomass logistics and transport optimization”*

C. Perpiñá, D. Alfonso, A. Pérez-Navarro, E. Peñalvo, C. Vargas, R. Cárdenas  
Instituto de Ingeniería Energética, Universidad Politécnica de Valencia  
Camino de Vera s/n Edificio 8E, 2ª, 46022 Valencia

▪ **Biomass & Bioenergy (Elsevier). Vol. 33, pp. 1070-1079 (2010)**

*“Methodology for the evaluation of distributed biomass resources and optimization of management and energy use”*

D. Alfonso, C. Perpiñá, A. Pérez-Navarro, E. Peñalvo, C. Vargas, R. Cárdenas  
Instituto de Ingeniería Energética, Universidad Politécnica de Valencia  
Camino de Vera s/n Edificio 8E, 2ª, 46022 Valencia

▪ **I. J. of Geographical Information Science (Taylor&Francis). Revisión 2011**

*“Enhancement of GIS-based Application using a Desktop Grid Infrastructure”*

Andrés García-García, Carolina Perpiñá, Carlos de Alfonso, Vicente Hernández  
Instituto de Instrumentación para Imagen Molecular (I3M)  
Instituto de Ingeniería Energética,  
Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia

▪ **Energy conversion and management (Elsevier). Revisión 2011**

*“Global analysis of a biomass plant as a demand response resource”*

Carolina Perpiñá, Rogelio Cárdenas, Guillermo Escrivá, David Alfonso  
Instituto de Ingeniería Energética, UPV. Universidad Politécnica de Valencia  
Camino de Vera s/n Edificio 8E, 2ª, 46022 Valencia

▪ **Energy policy (Elsevier). Revisión 2011**

*“Multicriteria evaluation in GIS environments for siting biomass plants”*

Carolina Perpiñá, Jose C. Martínez-Llario, Ángel Pérez-Navarro, David Alfonso  
Instituto de Ingeniería Energética, Universidad Politécnica de Valencia  
Camino de Vera s/n Edificio 8E, 2ª, 46022 Valencia

▪ **Computers & Operational Research (Elsevier). Revisión 2011**

*“Location models for the optimal placement of a biomass plant and storage centres”*

Carolina Perpiñá, Jose C. Martínez-Llario, Ángel Pérez-Navarro, David Alfonso  
Instituto de Ingeniería Energética, Universidad Politécnica de Valencia  
Camino de Vera s/n Edificio 8E, 2ª, 46022 Valencia

Algunas de las comunicaciones más relevantes en congresos nacionales e internacionales se detallan a continuación:

▪ **IEEE- Conference on sustainable alternative energy - Valencia'09**

“Technical and economical feasibility analysis of biomass gasification power plants in a Mediterranean area”

▪ **17th European Biomass. Conference & Exhibition. From Research to market deployment. Hamburgo (Alemania), Junio 29 - 3, 2009**

“BIODER project: biomass distributed energy resources assessment and logistic strategies for siting biomass plants in the Valencia province”

▪ **International conference on renewable energies and power quality (ICREPO9), Valencia (España), Abril 17 – 20, 2009**

“GIS based advanced biomass integral optimization model for energy applications”

▪ **3rd Iberian Grid Infrastructure Conference (IBERGRID'09), Valencia (España), Mayo 20 – 24, 2009**

“Biomass@UPV: Computational Resources Optimization of GIS based Application using a BOINC Infrastructure”

▪ **16th European Biomass Conference & Exhibition. From Research to market deployment. Valencia (España), Junio 6 – 9, 2008**

“Methodology Gis-based for biomass logistic and transport optimisation”

▪ **II International Congress of Energy and Environment Engineering and Management. Badajoz, Spain. June 6- 8, 2007. Official communications book of the “2nd International Congress Energy and Environment Engineering and Management”**

“Aplicación de los sistemas de información geográfica para la ubicación óptima de centrales de bioenergía en la C. Valenciana”

---

**CAPÍTULO 8.**  
**PROYECTOS FUTUROS**

---



En este trabajo convergen varias disciplinas con una misma finalidad, la de desarrollar una metodología para la localización de plantas de biomasa y la evaluación de los recursos biomásicos en un territorio. Las metodologías propuestas tienen un punto común y fundamental en el estudio y es que su marco de aplicación está determinado por los Sistemas de Información Geográfica. A continuación, describimos cuales son los proyectos y líneas futuras que se proponen como resultado de este primer enfoque

Trataremos en primera instancia la evaluación y localización de los **recursos biomásicos**, que en este estudio se han limitado a los procedentes de residuos agrícolas y forestales, y además han sido calculados a partir de cartografía vectorial procedente de fuentes oficiales, como es el Mapa de cultivos y aprovechamientos de España y el Inventario Nacional Forestal III. Haciendo revisión de la literatura se puso de manifiesto que existen algunos estudios en el ámbito forestal para determinar la cantidad de biomasa y su localización geográfica mediante la aplicación de técnicas de teledetección. Pero, quizás por una mayor complejidad y menor estabilidad en los cultivos no se han llevado a cabo estudios mediante dichas técnicas en el ámbito agrícola. Esta sería una línea de investigación claramente determinante a la hora de evaluar la biomasa agrícola, tanto hortícola como arbórea, desarrollando una metodología para tal fin.

En definitiva, los recursos biomásicos son una fuente más de las catalogadas como **energías renovables** (Anexo I) y disponen de una clara dependencia con el territorio como hemos visto a lo largo de este estudio. Pero, estos recursos no son la única fuente de energía que manifiesta esta gran dependencia, sino que tanto la energía eólica, como la solar, como la hidráulica o la geotérmica, también tienen esta característica. Por ello, se plantea el posible desarrollo e implementación de una aplicación que integre todas o gran parte de estas fuentes de energía en un entorno SIG, y cada una de ellas determinada por módulos independientes con la capacidad de introducir determinados datos de entrada y, además, con una base cartográfica, con el objetivo de apoyar en la toma de decisiones en la planificación energética de un territorio. En concreto sería un “simulador”, que pueda representar los cambios de escenarios, de variables y parámetros, con la finalidad de convertirse en un SDSS (*Spatial Decision Support System*) para apoyar en la toma de decisiones.

En lo referente a las **localización** de plantas de biomasa mediante modelos de localización basados en programación lineal en entornos SIG, se abre una clara línea de investigación en lo que se refiere a desarrollar modelos de localización más realistas o planteados desde otro punto de vista que no se ha tratado en este trabajo, como pudiera ser dada una cantidad de biomasa cuantas plantas serían necesarias y óptimas en un territorio. Esto respondería los modelos clasificados como de costes fijos tanto con capacidad limitada como ilimitada, e incluso nuevos personalizados. Por otra parte, hemos visto en el transcurso de este trabajo las limitaciones que han surgido al resolver en entornos SIG este tipo de modelos basados en programación lineal, las cuales podrían ser superadas y resueltas mediante la automatización de procesos y la implementarlos de éstos un SIG. Además, es necesaria la actualización de resultados una vez se hayan producido cambios en determinadas variables o parámetros y analizar como afectan estos cambios a los resultados, es decir, analizar la sensibilidad de las variables para poder estimar el error en las ubicaciones óptimas de las centrales de bioenergía según la metodología aplicada.





---

**CAPÍTULO 9.**  
**BIBLIOGRAFÍA**

---



- Alfonso, D., Perpiñá, C., Pérez-Navarro, A., Peñalvo, E., Vargas, C., Cárdenas, R. (2009). "Methodology for optimization of distributed biomass resources evaluation, management and final energy use." *Biomass&Bioenergy*, 33, 1070 - 1079.
- Arcila Garrido, M. (2003). *Sistemas de Información Geográfica y Medio ambiente. Principios Básicos*, Servicio de Publicaciones, Universidad de Cádiz.
- Arostegui, M. A., Kadipasaoglu, S.N., Khumawala, B.M. (2006). "An empirical comparison of tabu Search, Simulated Annealing, and Genetic algorithms for facilities location problems." *International Journal of production Economics*, 103, 742 - 754.
- Ascough, I., J.C., Green, L. Ma, Ahjua, L.R. (2005). "Key Criteria and Selection of Sensitivity Analysis Methods Applied to Natural Resource Models." *USDA-ARS, Great Plains Systems Research Unit, Fort Collins, CO 80526*.
- Ashayeri, J., Heuts, R., Tammel, B. (2005). "A modified simple heuristic for the p-median problem, with facilities design applications." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 21, 451 - 464.
- Athanasios, A. R., Tsiopoulos, I.P. (2010). "Locating a bioenergy facility using a hybrid optimization method." *International Journal of production Economics*, 123, 196 -209.
- Averbackh, I., Berman, O. (1998). "Minimax regret p-center location on a network with demanda uncertainty." *Location Science*, 5, 247 - 254.
- Aymerich, M., et al. (1994). *Transportes. Un enfoque integral*, Madrid.
- Barba-Romero, S., Pomerol, J.C. (1997). *Decisiones Multicriterio. Fundamentos teóricos y utilización práctica*, Madrid.
- Beccali, M., Columba, P., D'Alberti, V., Franzita, V. (2009). "Assesment of bioenergy potential in Sicily: a Gis-based support methology." *Biomass&Bioenergy*, 33, 79 - 87.
- Berman, O., Drezner, Z., Krass, D. (2010). "Generalized coverage: New developments in covering location models." *Computers operations research*, 37, 1675 - 1687.
- Berman, O., Krass, D. (2002). "the generalized maximal covering location problem." *Computers operations research*, 29, 563 - 581.
- Bórdas, R. (2006). "Implementación de una herramienta basada en tecnología SIG y técnicas de decisión multicriterio para la obtención de mapas de orientación a la ubicación de instalaciones de gestión de residuos." *Mapping Interactivo*, 107 Enero-Febrero.
- Bosque, J. (1997). *Sistemas de Información Geográfica*, Madrid.
- Bosque, J. (2002). "Seminario intenacional sobre "SIG, Teledetección y Medio Ambiente"." *Curso: Interrelación de SIG y técnicas de evaluación multicriterio para la planificación territorial y ambiental*, Escuela politécnica del Ejército, Quito (Ecuador). Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá (Madrid).
- Bosque, J., Moreno, A. (2004). *Sistemas de Información Geográfica y localización de instalaciones y equipamientos*, Madrid.
- Bosque, J., Palm, F., Gómez, M. (2007). "LOCALIZA: una herramienta SIG para resolver problemas de localización óptima." In: *I Jornadas de SIG Libre*, S. d. s. d. i. g. i. teledetecció, ed., Universitat de Girona, 16.
- Bosque Sendra, J., Gómez Delgado, M., Palm Rojas, F. (2006). "Un nuevo modelo para localizar instalaciones no deseables: venyajas derivadas de la integración de modelos de localización-asignación y SIG." *Cuadernos Geográficos*, 39, 53 - 68.

- Bosque Sendra, J., Moreno, A. (2004). *Sistemas de Información Geográfica y localización de instalaciones y equipamientos*, Madrid.
- Brandeau, M. L., Chiu, S.S. (1989). "An Overview of Representative Problems in Location Research." *Management Science*, 35, 645 - 674.
- Bringberg, J., Juel, H. (1998). "A minisum model with forbidden regions for locating a semi-desirable facility in the plane." *Location Science*, 6( 109 - 120).
- Butchholz, T., Rametsteiner, E., Volk, T.A., Luzadis, V.A. (2009). "Multicriteria Analysis for bioenergy systems assessments." *Energy Policy*, 37, 484 - 495.
- Chad, P. (1996). *Como escribir una Tesis Doctoral –PhD/DPhil*, Australia.
- Chaudhuri, S., Garg, N., Ravi, R. . (1998). "The p-neighbor k-center problem." *Information processing letters*, 65, 131 - 134.
- Chen, K., Blong, R., Jacobson, C. (2001). "MCE-RISK integrating multicriteria evaluation and GIS for risk decision making in natural hazards." *Environmental Modelling&Software*, 16, 387-397.
- Chen, Y., Yu, J., Shabbaz, K., Xevi, E. (Year). "A GIS-Based analysis of Multi-criteria Weights." *18th World IMACS/MODIS Congress*, Australia.
- Cheng-Dar, Y., Grant Gwo-Liang, Y. (2007). "Decision support system for exploiting local renewable energy sources: A case study of the Chigu area of southwestern Taiwan." *Energy Policy*, 35, 383-394.
- Cheng, T. C. E., Kang, L., Ng, C.T. (2007). "An improved algorithm for the p-center problem on interval graphs with unit lengths." *Computers operations research*, 34, 2215 - 2222.
- Church, R. L. (2002). "Geographical information systems and location science." *Computers operations research*, 29, 541 - 562.
- Church, R. L. (2008). "BEAMR: An exact and approximate model for the p-median problem." *Computers operations research*, 35, 417 - 426.
- Church, R. L., Murray, A. T., Weintraub, A. (1998). "Locational issues in forest management." *Location Science*, 6, 137 - 153.
- Church, R. L., Reville, C. (1974). "The Maximal Covering Location Problem". *Papers of the Regional Science Association*, 32, 101 - 118.
- Comisión de las Comunidades Europeas. (2001). "Desarrollo sostenible en Europa para un mundo mejor: Estrategia de la Unión Europea para un desarrollo sostenible." *Bruselas*.
- Comisión de las Comunidades Europeas. (2005). "Plan de acción sobre la biomasa."
- Comisión Europea. (1997). "Libro Blanco para una Estrategia y un Plan de Acción Comunitarios 2008-2010."
- Comisión Europea. (2002). "El Libro Verde. Hacia una Estrategia Europea de Seguridad de Suministro Energético."
- Comisión Nacional de la Energía. (2009). "Directiva 2009/29/CE." *Comisión Europea*.
- Consejería de Urbanismo. (Ayuntamiento de Marbella). "Estudio de impacto Ambiental." *Plan general de Ordenación estadística de Marbella*.
- Conselleria d'Industria comerç i energia. "Plan de Ahorro y Eficiencia Energética de la Comunidad Valenciana 2001-2010." *Agencia valenciana de la Energía*.
- Conselleria d'obres públiques urbanisme y transport. (1998). *Litología, aprovechamiento de rocas industriales y riesgo de deslizamiento en la Comunidad Valenciana*, Valencia.
- Conselleria d'obres públiques urbanisme y transport. (1999). *El planeamiento urbanístico en la Comunidad Valenciana*, Valencia.

- Conselleria de Infraestructuras y transporte. (2010). "Manual de usuario de la extensión de redes gvSIG 1.9." <http://www.gvsig.org/web/docusr/redes-userguide>.
- Conselleria de Obras públicas Urbanismo y Transporte. (2001). "Acuerdo de 26 de julio de 2001, del gobierno Valenciano por el que se aprueba el Plan Eólico de la Comunidad Valenciana ", 2001/7601, ed.
- Cortinhal, M. J., Captivo, M.E. (2003). "Upper and lower bounds for the single source capitated location problem." *European Journal of Operational Research*, 151, 333 - 351.
- Crosetto, M., Tarantola, S. (2001). "Uncertainty and sensitivity analysis: tools for GIS-based model implementation." *International Journal of Geographical Information Science*, 15, 415 - 437.
- Current, J., Daskin, M., Schilling, D. (2001). *Facility Location: Applications and methods* Springer-Verlag.
- Current, J., Min, H., Schilling, D. (1990). "Multiobjective analysis of facility location decisions." *European Journal of Operational Research*, 49, 295 - 307.
- Current, J., Ratick, S. (1995). "A model to assess risk, equity and efficiency in facility location and transportation of hazardous materials." *Location Science*, 3, 187 - 201.
- Current, J., Ratick, S., ReVelle, C. (1997). "Dynamic facility location when the total number of facilities is uncertain: A decision analysis approach." *European Journal of Operational Research*, 110, 597 - 609.
- D'Ovidio, A., Pagano, M. (2009). "Probabilistic multicriteria analysis for optimal biomass power plant design." *Electric Power Systems research*, 79, 645 - 652.
- Dantzig, G. B., Thapa, Munkund N. (1997). *Linear Programming*, New York.
- Daskin, M. S. (1995). *Network and discret location: models, algorithms and applications* New York.
- De Cos Guerra, O. (2007). "SIG y evaluación multicriterio: propuesta metodológica para cuantificar el grado de metropolización en el territorio." *Mapping Interactivo*.
- De Juan, J., et al. (2003). *Energías Renovables para el desarrollo*, Madrid.
- De Mol, R. M., Jogens, M.A.H., Van Beek, P., Gigler, J.K. . (1997). "Simulation and optimization of the logistics of biomass fuel collection." *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 45, 219 - 228.
- Diéguez, R., ReVelle, C. (1996). "A langrangean heuristic for the maximal covering location problem." *European Journal of Operational Research*, 88, 114 - 123.
- Domínguez Bravo, J., Ciria, P., Esteban, L.S., Sánchez, D., Lasry, P. (2003). "Evaluación de la biomasa potencial como recurso energético en la región de Navarra (España)." *Geofocus - Revista internacional de Ciencia y Tecnología de la información Geográfica*, 3, 1 - 10.
- Drezner, T., Drezner, Z., Salhi, S. (2002). "Solving the multiple competitive facilities location problem." *European Journal of Operational Research*, 142, 132 - 151.
- Drezner, Z. (1994). "On the conditional p-median problem." *Computers operations research*, 22, 525 - 530.
- Eiselt, H. A. (2007). "Locating landfills - Optimization vs. reality." *European Journal of Operational Research*, 179, 1040 - 1049.
- Erkut, E., Karagiannidis, A., Perkoulidis, G., Tjandra, S. A. (2006). "A multicriteria facility location model for municipal solid waste management in North Greece." *European Journal of Operational Research*, 187, 1402 - 1421.
- Esri, E. S. R. I. (1994). *Arc/Info version 7. Network Analyst*, California, USA.
- Expert Choice. (2009). "<http://www.expertchoice.com/>."

- Fernández, E., Puerto, J. (2003). "Multiobjective solution of the cuncapacited plant location problem." *European Journal of Operational Research*, 145, 509 - 529.
- Fernández, J., Fernández, P., Pelegrin, B. (2000). "A continuous location model for siting a non-noxious undesirable facility within a geographical region." *European Journal of Operational Research*, 121, 251 - 274.
- Francis, R. L., White, J.A. (1974). *Facility layout and location. An analytical approach*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
- Freppaz, D., Minciardi, R., Robba, M., Rovatti, M., Sacile, R., Taramasso A. (2004). "Optimizing forest biomass exploitation for energy supply at a regional level." *Biomass&Bioenergy*, 26, 15 - 25.
- Frombo, F., Minciardi, R., Robba, M., Rosso, F., Sacile, R. (2009). "Planning woody biomass logistics for energy production: A strategy decision model." *Biomass&Bioenergy*, 33, 372 - 383.
- Galvao, R. D., Acosta, L.G., Boffey, B. (2002). "A hierarchical model for the location of perinatal facilities in the municipality of Rio de Janeiro." *European Journal of Operational Research*, 138, 495 - 517.
- Gar -On Yeh, A., Hong Chow, M. (1997). "An integrated GIS and location-allocation approach to public facilities planing -an example of open space planning-." *Computers, environment and urban systems*, 20, 339 - 350.
- García, A., Perpiñá, C., De Alfonso, C., Hernández, V. (2011). "Enhancement of GIS-based Applications using Desktop Grid Infrastructures." *Enhancement of GIS-based Applications using Desktop Grid Infrastructures*.
- Generalitat Valenciana. (1990). "Decreto 162/1990, de 15 Octubre, Reglamento de la Ley 2/1989, de 3 de Marzo de 1989, del impacto ambiental." n. DOGV, de 30 de Octubre de 1990, ed.
- Generalitat Valenciana. (2006). "Ley 2/2006, de 5 de mayo, de Prevención de la Contaminación y Calidad Ambiental." n. DOGV, de 11 de Mayo de 2006, ed.
- Gómez-Senent, E. (1998). *La ciencia de la creación de lo artificial : un paradigma para la resolución de problemas* Universidad Politécnica de valencia.
- Gómez, D. (1992). *Evaluación de impacto ambiental*, Madrid.
- Gómez, M., Barredo, J.L. (2005). *Sistemas de Información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio* Madrid.
- Grabau, R., Meyer, B. (1998). "Multicriteria optimization of lanscapes using GIS-based functional assessment." *Landscape and urban planning*, 43, 21-33.
- Graham, R. L., English, B.C., Noon, C.E. (2000). "A geographic information system-based modeling system for evaluating the cost of delivered energy crop feedstok." *Biomass&Bioenergy*, 18, 309 - 329.
- Grupo DMD. (2011). "[http://vallasarte.com/VallasArte/Vallas\\_Arte.html](http://vallasarte.com/VallasArte/Vallas_Arte.html)."
- Hakimi, S. L. (1964). "Optimal locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph." *Operations Research*, 12, 450 - 459.
- Hamacher, H., Nickel, S. (1998). "Classification of location models." *Location Science*, 6, 229 - 242.
- Hamelinck, C., Suurs, RAA., Faaij, APC. (2005). "International bioenergy transport costs and energy balance." *Biomass&Bioenergy*, 29, 114-134.
- Hochbaum, D. S., Pathria, A. (1997). "Generalized p-Center problems: Complexity results and approximation algorithms." *European Journal of Operational Research*, 100, 594 - 607.
- <http://www.expertchoice.com/>. (2009). "Expert Choice."

- Hubina, T., Ghribi, M. (2008). "GIS-based decision support tool for optimal spatial planning of landfill in Minsk region, Belarus." *11th AGILE International Conference on Geographical Information Science 2008*, Universidad de Girona, Spain.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2007). *Energías Renovables*, Madrid.
- Jagtar, S., Panesar, B.S., Sharma, S.K. (2008). "Energy potential through agricultural biomass using geographical information system. A case study of Punjab." *Biomass&Bioenergy*, 32, 301-307.
- Jagtar, S., Panesar, B.S., Sharma, S.K. (2010). "A mathematical model for transporting the biomass " *Biomass&Bioenergy*, 34, 483 - 488.
- Jordan, C., Torregrosa, J. (1996). *Introducción a la teoría de grafos y sus algoritmos*, Valencia.
- Kaiser, C. (2000). "Optimising the Location of Services The Case of Pharmacies in Western Australia." In: *The University of Adelaide T. N. K. C. f. t. S. A. o. G. I. S. (GISCA)*, ed.
- Kinoshita, T., Keisuke, I., Koki, I., Hiroshi, K., Yoshiki, Y. (2008). "A spatial evaluation of forest biomass usage using GIS." *Applied Energy*, 86, 1-8.
- krumke, S. O. (1995). "On a generalization of the p-Center Problem." *Information processing letters*, 56, 67 - 71.
- Lee, J. M., Lee, Y.H. (2010). "Tabu based heuristics for the generalized hierarchical covering location problem." *Computer & Industrial Engineering*, 58, 638 - 645.
- Lopes, R. B., Barreto, S., Ferreira, C., Sousa Santos, B. (2008). "A decision-support tool for a capacitated location-routing problem." *Decision Support Systems*, 46, 366 - 375.
- Love, R. F., Morris, J.G., Wesolowsky, G.O. (1988). *Facilities Location. Models & Methods*, Elsevier Science Publishing Co., Inc., New york.
- Malczewski, J. (1999). *Gis and Multicriteria decision analysis*, USA / Canada.
- Mandell, M. B. (1998). "Covering models for two-tiered emergency medical services systems." *Location Science*, 6, 355 - 368.
- Marbella, C. d. U. A. d. "Estudio de impacto Ambiental. ." *Plan general de Ordenación estadística de Marbella*.
- Matthies, M., Giupponi, C., Ostendorf, B. (2007). "Environmental decision support systems: Current issues, methods and tools." *Environmental Modelling & Software*, 22(123 - 127).
- Melkone, S., Daskin, M.S. (2001). "Capacitated facility location/network design problems." *European Journal of Operational Research*, 129, 481- 495.
- Mena Frau, C., Gajardo Valenzuela, J., Ormazábal Rojas, Y. (2006). "Modelación espacial mediante geomática y evaluación multicriterio para la ordenación territorial." *Revista de la Facultad de Ingenieros. Universidad de Tarapacá*, 14(1), 81 - 89.
- Ministerio de Industria, T. y. C. (2005). *Plan Nacional de Energías Renovables 2005-2010*, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.
- Ministerio de Industria y Comercio. (2005). "Plan de Acción 2005-2007 de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España 2004-2012." *Instituto para la diversificación y el Ahorro energético*.
- Ministerio de Industria y Comercio. (2006). "Plan Nacional de Asignación de derechos de emisión 2008-2012."

- Ministerio de Medio Ambiente. (2008). "Real Decreto Legislativo 1/2008, de 11 de enero, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos." 1405, ed.
- Mitchell, C. P. (2000). "Development of decision support systems for bioenergy applications." *Biomass&Bioenergy*, 18, 265 - 278.
- Mladenovic', N., Brimberg, J., Hansen, P., Moreno-Pérez, J.A. (2007). "The p-median problem: A survey of metaheuristic approaches." *European Journal of Operational Research*, 179, 927 - 939.
- Mocholi, M., Sala, R. (1984). *Programación lineal. Ejercicios y aplicaciones* Madrid.
- Moreno-Jimenez, A. (1999). "En busca de la localización óptima para instalaciones perjudiciales: propuesta de modelos y resolución con sistemas de información geográfica." *Boletín de la A.G.E.*, 27, 99 - 115.
- Moreno-Jimenez A., H. R. L. (2003). "Modelling a single type of environmental impact from an obnoxious transport activity: implementing locational analysis with GIS." *Environment and planning*, 35, 931 - 946.
- Munier, N. (2004). *Multicriteria environmental assessment*, The Netherlands.
- Muñoz-Pérez, J., Saameño-Rodríguez, J.J. (1999). "Location of an undesirable facility in a polygonal region with forbidden zones." *European Journal of Operational Research*, 114, 372 - 379.
- Murawski, L., Church, R.L. (2009). "Improving accessibility to rural health services: The maximal covering network improvement problem." *Socio-Economic Planning Sciences*, 43, 102 -110.
- Murray, A. T., Church, R.L. (1996). "Solving the anti-covering location problem using Lagrangian Relaxation." *Computers operations research*, 24, 127 - 140.
- Murray, A. T., Gerrard, R.A. (1997). "Capacitated service and regional constraints in location-allocation modeling." *Location Science*, 5, 103 - 118.
- Naciones Unidas. (1998). "Protocolo de kyoto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático".
- Nagel, J. (2000). "Determination of an economic energy supply structure based on biomass using a mixed-integer linear optimization model." *Ecological Engineering*, 16, 91 - 102.
- Noon, C. E., Daly, M.J. (1996). "Gis-Based biomass resource assesment with BRAVO." *Biomass&Bioenergy*, 10, 101-109.
- Nozick, L. K. (2001). "The fixed charge facility location problem with coverage restrictions." *Transportation Research*, 37, 281 - 296.
- Owen, S. H., Daskin, M.S. (1998). "Strategic facility location: A review." *European Journal of Operational Research*, 111, 423 - 447.
- Panicheli, L., Gnansounou, E. (2008). "GIS-based approach for defining bioenergy facilities location: A case study in Northern Spain based on marginal delivery costs and resources competition between facilities." *Biomass&Bioenergy*, 32, 289-300.
- Pérez-Navarro, A., Alfonso, D., Perpiñá, C., Peñalvo, E. (2008). "Estrategia territorial de la Comunidad Valenciana. Definición de los indicadores para la ocupación de los suelos para usos urbanos. ." *Conselleria de Medi Ambient, Aigua, Urabnisme y Habitatge*.
- Perpiñá, C., et al. (2008). "Methodology based on Geographic Information Systems for biomass logistics and transport optimization." *Renewable Energy*, 34, 555-565.
- Plastria, F., Carrizosa, E. (1999). "Undesirable facility location with minimal covering objectives." *European Journal of Operational Research*, 119, 158 - 180.



- Revelle, C. S., Eiselt, H.A. (2005). "Location Analysis." *Encyclopedia of Social Measurement*, 2.
- ReVelle, C. S., Eiselt, H.A., Daskin, M.S. (2008). "A bibliography for some fundamental problem categories in discrete location science." *European Journal of Operational Research*, 184, 817 - 848.
- Robusté, F. (2005). *Logística del transporte*, Barcelona.
- Rolland, E., Schilling, D.A., Current, J.R. (1996). "An efficient tabu search procedure for the p-Median Problem." *European Journal of Operational Research*, 96, 329 - 342.
- Ruíz, T. (1998). *Transporte y Territorio*, Valencia.
- Sahin, G., Süralb, H. (2007). "A review of hierarchical facility location models." *Computers operations research*, 34, 2310 - 2331.
- Salazar González, J. J. (2001). *Programación Matemática*, Madrid.
- Saltelli, A., Chan, K., Scott, E.M. (2000). *Sensitivity Analysis*, John Wiley & Sons, Chichester.
- Saltelli, A., Tarantola, S., Chan, K. (1999). "A role for Sensitivity analysis in presenting the results from MCDA studies to decision makers." *Journal of Multi-criteria decision analysis*, 8, 139-145.
- Seguí, J., Petrus, JM. (1991). *Geografía de redes y sistemas de transporte*.
- Sennblad, G. (1994). "Small Scale Forestry." *Forest fuel* 94, 11-18.
- Serra, D., Marianov, V. (1998). "The p-median problem in a changing network: the case of Barcelona." *Location Science*, 6, 383 - 394.
- SIMLAB. (2004). "Simulation Environment for Uncertainty and Sensitivity Analysis." *Joint Research Centre of the European Commission*, Version 2.2(web: <http://simlab.jrc.ec.europa.eu/>).
- Sokhansanj, S., Kumar, A., Turhollow, A.F. (2006). "Development and implementation of integrated biomass supply analysis and logistics model (IBSAL)." *Biomass&Bioenergy*, 30, 838 - 847.
- Sorensen P., C. R. (2010). "Integrating expected coverage and local reliability for emergency medical services location problems." *Socio-Economic Planning Sciences*, 44, 8 - 18.
- Sridharan, R. (1995). "The capacited plant location problem." *European Journal of Operational Research*, 87, 203 - 213.
- Sule, R. (2001). *Logistics of facility location and allocation*, New York.
- Sumathi, V. R., natesan, U., Sarkar, C. (2008). "GIS-based approach for optimized siting of municipal solid waste landfill." *Waste Management*, 28, 2146 - 2160.
- Suzuki, A., Drezner, Z. (1996). "The p-center location problem in an area." *Location Science*, 4, 69 - 82.
- Tormos, P., Lova, A. (2003). *Investigación operativa para ingenieros*.
- Velázquez-Martí, B., Fernandez-Gonzalez,E. (2010). "Mathematical algorithms to locate factories to transform biomass in bioenergy focused on logistic network construction." *Renewable Energy*, 35, 2136 - 2142.
- Voivontas, D., Assimacopoulos, D., Koukios, EG. (2001). "Assesment of biomass potential for power production: a GIS-based method." *Biomass&Bioenergy*, 43(101 - 112).
- Voivontas, D., et al. (1998). "Evaluation of Renewable Energy potencial using GIS decision support system." *Renewable Energy*, 13, 333-344.
- Voogd, H. (1983). *Multicriteria Evaluation for urban and regional planning*, London.

- Wagner, M. R., Bhadury, J., Peng, S. (2009). "Risk management in uncapacitated facility location models with random demands." *Computers operations research*, 36(1002 - 1011).
- Xun, S., et al. (2008). "Using spatial information technologies to select sites for biomass power plants: A case study in Guangdong Province, China." *Biomass&Bioenergy*, 32, 35-43.

---

**ANEXO I**

**CONCEPTOS GENERALES DE LAS ENERGÍAS  
RENOVABLES**

---



### ***AI.1. ENERGÍAS RENOVABLES***

Las fuentes de energía, según el tema que nos ocupa, pueden clasificarse en *energías renovables* y *no renovables*. Las energías renovables se definen como aquellas que se producen de forma continua y que tiene una ilimitada duración a escala humana, y además son respetuosas con el medio ambiente. Por el contrario, las energías no renovables (fuentes de energías fósiles) generan grandes emisiones y residuos, son limitadas, contaminan y a escala nacional provocan dependencia energética con el exterior. Todo hace pensar que en los próximos años se ha de producir un importante crecimiento en el uso de ER como consecuencia de la subida de los precios de los combustibles fósiles y otros factores adicionales. Cada vez más, estas fuentes de ER tienden a ser más rentables aunque, no todas tienen el mismo grado de desarrollo. Las energías renovables, además, por su carácter autóctono contribuyen a disminuir la dependencia a los suministros externos, aminoran el riesgo de un abastecimiento poco diversificado, favorecen el desarrollo tecnológico y respetan el medio ambiente (Ministerio de Industria 2005).

Brevemente vamos a enumerar y describir algunos aspectos de cada una de las fuentes de energías renovables y su dependencia con el territorio, fijando nuestra atención en el área de la biomasa por la estrecha relación con el presente estudio. Por ello este capítulo la describe con mayor detalle.

#### ***AI.1.1. Energía Solar***

El sol produce constantemente energía electromagnética, que nos llega directamente a la Tierra. La radiación solar global consta de tres componentes: radiación directa, difusa y reflejada. La radiación solar directa es la fracción de la radiación que tiene una trayectoria bien definida en forma de ondas electromagnéticas. Irradiación es la energía incidente en una superficie por unidad de superficie y a lo largo de un cierto periodo de tiempo. El recurso solar es abundante en España, y dispone de condiciones muy adecuadas para la energía solar, con áreas de alta irradiancia.

Conocer los recursos en tecnologías de concentración supone tener datos de la radiación directa. La medida de la radiación directa es costosa y compleja, por lo que son pocas las estaciones meteorológicas que disponen de datos. La evaluación del potencial solar es una labor que requiere de un periodo muy amplio de toma de datos, del orden de años. A esto se suma la necesidad de realizar una toma de datos suficientemente detallada, para que los valores obtenidos sean representativos y reflejen las particularidades de cada microclima. Normalmente se emplean modelos que estiman la radiación directa a partir de otras variables meteorológicas o de datos de satélites. Salvo excepciones no existen datos de radiación directa disponibles.

En términos generales se puede decir que las principales repercusiones de implantar instalaciones solares son el impacto visual y la ocupación de terrenos. Esta ocupación de terrenos en algunos emplazamientos específicos podría tener incidencia sobre la flora y la fauna del emplazamiento, aunque el impacto no es superior al de cualquier planta convencional.

*Solar Fotovoltaica:* La producción de energía eléctrica directamente mediante el efecto fotovoltaico presenta al día de hoy indudables ventajas energéticas, industriales, medioambientales, sociales, etc. Entre ellas, la implantación de la energía solar fotovoltaica tan amplia como sea posible contribuirá a impulsar un futuro desarrollo tecnológico, que lleve a este procedimiento de generación eléctrica a términos cada vez más competitivos frente a otros procedimientos de generación. La principal característica de este recurso es estar disponible en toda la superficie al mismo tiempo, estando no obstante condicionado por las sombras de elementos naturales y artificiales y por las particulares condiciones climáticas de cada área geográfica. Según el tipo de aplicación, de forma muy general, se puede distinguir entre instalaciones fotovoltaicas conectadas a red e instalaciones aisladas de red.

*Solar térmica:* La aplicación mas generalizada de los sistemas solares es la generación de agua caliente sanitaria (ACS), tanto en viviendas como en establecimientos hoteleros, residencias, hospitales, campings, instalaciones deportivas, etc. Por otra parte, siguen presentes las aplicaciones de calentamiento del agua de las piscinas.

*Solar termoeléctrica:* La energía solar termoeléctrica agrupa un conjunto de tecnologías diferenciadas que se caracterizan por realizar concentración solar con el fin de alcanzar temperaturas que permitan la generación eléctrica. Su aplicación puede llegar a constituir una forma de generación de energía competitiva y con las ventajas que corresponde a una fuente renovable y respetuosa con el medioambiente. Las plantas termoeléctricas aprovechan la radiación directa por lo que al no existir datos se parte de estimaciones para elegir los posibles emplazamientos, para posteriormente pasar por un periodo de medidas.

#### ***AI.1.1.2. La energía eólica***

El viento también tiene su origen último en el Sol, ya que se origina por el diferente calentamiento de las distintas zonas de la atmósfera, dando lugar a diferentes masas de aire de diferente densidad, lo que hace descender a las más densas y elevar las más ligeras. Se debe a la energía cinética del aire, la potencia que se obtiene es directamente proporcional al cubo de la velocidad del viento, por tanto pequeñas variaciones de velocidad, dan lugar a grandes variaciones de potencia. Para la producción eléctrica se utilizan unas máquinas que se denominan aerogeneradores. El desarrollo tecnológico actual, así como un mayor conocimiento de las condiciones del viento en las distintas zonas, esta permitiendo la implantación de grandes parques eólicos conectados a la red eléctrica.

Los parques eólicos están localizados de modo preferente en áreas de montaña, en posiciones próximas a las líneas de cumbre, en donde se suele manifestar un alto potencial del recurso. En estas áreas, el grado de conservación natural suele ser bueno y, a veces, con alto valor paisajístico, por lo que la ocupación del terreno por las instalaciones del parque eólico es un potencial factor de impacto por su posible afección a los recursos naturales, paisajísticos o culturales de la zona. Quizás el factor medioambiental que más preocupa en la sociedad, lo representa la modificación de la calidad estética del escenario paisajístico, o impacto visual, ocasionado por la introducción de los aerogeneradores en un paisaje natural, de modo que habría que

estudiar detenidamente este impacto para conseguir minimizarlo. Otro aspecto a considerar como impacto, lo constituye el ruido producido tanto mecánica como aerodinámicamente por los componentes en rotación. Esto nos conduce a pensar que deben ser ubicados a unas distancias considerables de los núcleos de población y diseminados.

Aunque no se considera prioritario el desarrollo de la energía eólica marina a gran escala en el horizonte 2005-2010 de este Plan de las Energías Renovables, deberían plantearse unas medidas adicionales durante este período, que incluyeran una revisión al alza de la prima eólica para estas instalaciones, de tal manera que les dotasen de niveles de rentabilidad razonable. Igualmente, sería conveniente que se llevasen a cabo los estudios necesarios para la delimitación de zonas marinas compatibles con el aprovechamiento eólico, y prever las modificaciones oportunas de las infraestructuras eléctricas de transporte.

#### ***AI.1.1.3. La energía hidráulica***

El agua almacena energía según las características de su flujo y su posición dentro del campo de la gravedad. Al represar el agua, ésta eleva su cota dentro del campo gravitatorio y, por consiguiente, su energía potencial. De esta manera, primero obtenemos energía cinética que posteriormente se transforma en mecánica y eléctrica. El aprovechamiento de la energía potencial del agua para producir energía eléctrica utilizable, constituye en esencia la energía hidroeléctrica. Es por tanto un recurso renovable y autóctono, que depende de los recursos hidroeléctricos y del potencial hidroeléctrico posible de generar por las cuencas hidrográficas.

El diseño de un aprovechamiento hidroeléctrico ha de tener en cuenta el uso directo del agua, pero también prever los efectos indirectos que como consecuencia de su instalación, puedan afectar en mayor o menor medida al medio ambiente. No obstante, los impactos ambientales que se producen en la ejecución son escasos, aunque pueden adquirir mayor o menor relevancia dependiendo del tamaño de la central, su situación geográfica y su entorno físico, biológico y climático.

La más reciente evaluación del potencial hidroeléctrico se realizó en 1980, conteniendo, asimismo, una distribución por cuencas. La Ley de Aguas define la cuenca hidrográfica como aquél territorio en que las aguas fluyen al mar a través de una red de cauces secundarios que convergen en un cauce principal único.

#### ***AI.1.1.4. Geotérmica***

Es la manifestación de la energía térmica acumulada en rocas o aguas que se encuentran a elevada temperatura en el interior de la tierra.

Se le asigna carácter renovable en función de la baja agresión al entorno que supone su recuperación. La energía acumulada en zonas volcánicas o de anomalía térmica se aprovecha haciendo circular a su través agua o vapor que transporta hasta la superficie el calor almacenado en las zonas calientes.

La temperatura del fluido portador puede ser baja, media o alta dependiendo de la tipología del yacimiento geotérmico. Sólo este último caso permite disponer de suficiente vapor para la generación eléctrica en turbinas, el uso de las otras dos modalidades es el de calentamiento de agua y calefacción.

#### ***AI.1.1.5. La Biomasa***

A continuación desarrollamos el área de la biomasa detenidamente.

##### ***AI.1.1.5.1. Concepto de biomasa***

La aceptación del término *biomasa* para referirse al grupo de productos energéticos y de materias primas de tipo renovable es ampliamente utilizado en la actualidad. Estos productos energéticos se originan a partir de la materia orgánica formada por vía biológica, la cual almacenan energía que posteriormente se utiliza para distintos fines y mediante la aplicación de distintos procesos. Los procesos principales son la combustión (calentamiento directo o sistemas de calefacción por aire o agua) y la destilación (para la producción de biocombustibles). También los residuos urbanos se utilizan actualmente como combustibles para generación eléctrica mediante turbinas de gas.

El concepto genérico de biomasa es aquella que se utiliza con fines energéticos. La heterogeneidad es la característica fundamental del área de biomasa, una heterogeneidad que afecta tanto a la descripción de los materiales que pueden ser empleados, como a los combustibles, como a los posibles usos energéticos de los mismos, y que hace imposible abordar esta área desde una única perspectiva, pues existen tantas como combinaciones entre tipos de biomasa utilizables y tecnologías para su aprovechamiento energético. Respecto al tipo de recurso empleado, al igual que en el caso de la aplicación térmica son los residuos de industrias forestales y agrícolas los más utilizados, si bien existen proyectos puntuales en otras áreas. La dispersión de estos residuos y la pequeña escala de la mayoría de las explotaciones también son problemas a tener en cuenta, ya que dificultan la logística de aprovisionamiento, así como su transporte. Esta heterogeneidad hace necesario entender e identificar cada tipo de recurso y sus peculiaridades, para poder afrontar los obstáculos que se generan de la misma. Por ello, en el apartado siguiente se explica con un mayor detalle los principales recursos existentes.

Además la energía procedente de la biomasa cumple con el concepto de desarrollo sostenible intentando ser, en un futuro próximo, la competencia directa al carburante fósil. La definición aceptada para *desarrollo sostenible* es: aquel desarrollo que satisface las necesidades presentes sin hacer peligrar la posibilidad de que generaciones futuras puedan satisfacer las suyas. Para ello, en los países industrializados se deberá cambiar la manera de producir, consumir y organizarse, implicando para dicho cambio actitudes personales, empresariales y de la administración.



#### **AI.1.1.5.2. Origen, naturaleza y tipos de biomasa**

En su más amplio sentido, el término *biomasa* se refiere a cualquier tipo de materia orgánica que haya tenido su origen a partir de un proceso biológico, extendiéndose este concepto tanto a productos de origen vegetal como animal. Las plantas utilizan la energía solar para realizar la fotosíntesis, para lo cual sintetizan materia orgánica a partir del CO<sub>2</sub> de la atmósfera, del agua y de las sustancias minerales del suelo. La continuación de este ciclo es la ingesta de esta materia orgánica vegetal por los herbívoros, que la transforman en energía química y música corporal. Para realizar una clasificación de los tipos de biomasa podemos recurrir a su origen, a sus componentes o a los residuos que se generan (De Juan 2003).

La biomasa, según su origen, puede clasificarse en distintos órdenes:

**Biomasa Primaria.** Forman parte de este grupo toda la biomasa de origen vegetal, como resultado de procesos fotosintéticos a partir de la luz solar.

**Biomasa secundaria.** Es la producida por seres heterótrofos que utilizan la biomasa primaria en su nutrición.

**Biomasa Terciaria.** Es la obtenida a partir de seres que se alimentan de biomasa secundaria.

La clasificación que puede realizarse de la biomasa atendiendo a la f fuente de energía (recurso) utilizada a partir de los residuos es la siguiente:

**Residuos forestales.** Son los residuos procedentes de los tratamientos y aprovechamientos de las masas vegetales para la defensa y mejora de éstas, obtenidos tras las operaciones de corta, poda y transporte a pista. El proceso para el aprovechamiento de estos recursos es complicada, utilizándose el astillado<sup>52</sup>, obteniéndose de esta forma un producto manejable y de granulometría homogénea. En los últimos años, se han desarrollado diversas tecnologías de compactación mediante la utilización de prensas con el fin de aumentar la densidad del material para su transporte. La obtención de este tipo de residuos va unida a actividades de limpieza, astillado y transporte, que superan sensiblemente los precios que el uso energético puede pagar, pero justificadas desde el punto de vista medioambiental.

Los problemas más destacados de este recurso son: La disponibilidad del recurso en cantidad, calidad y precio, la existencia en algunos casos de un uso alternativo y la ausencia de pretratamientos de adecuación del recurso.

**Residuos agrícolas leñosos.** Son los procedentes de las podas del olivo, frutales y viñedos. Estos residuos tienen un carácter estacional dependiendo del tipo de cultivo del que provienen. También es necesario realizar aplicarles tratamientos para homogeneizar y disminuir los costes de transporte, tales como el astillado o la compactación.

Los problemas más destacados de este recurso son: Disponibilidad del recurso en cantidad, calidad y precio, la dispersión y pequeña escala de las explotaciones agrícolas generadoras del recurso y la ausencia de pretratamiento de adecuación del recurso.

---

<sup>52</sup> Astillado y compactacion

**Residuos agrícolas herbáceos.** Son los recursos que provienen principalmente de la paja del cereal y cañote de maíz.

El problema más destacado de este recurso es la disponibilidad del mismo en cantidad, calidad y precio, debido a su estacionalidad coincidiendo con los periodos de cosecha de cada producto y a la variación anual de la producción agrícola.

**Residuos de industrias forestales y agrícolas.** Los residuos procedentes de industrias forestales se generan en industrias de primera y segunda transformación de la madera. Éstos forman un conjunto de materiales heterogéneos entre los que se encuentran las astillas, cortezas, serrín, recortes, cilindros, fino y otros. Todos ellos se obtienen en los mismos establecimientos industriales donde se originan, teniendo maquinaria adecuada para tal fin. El aprovechamiento de estos residuos es elevado, aunque con una dependencia relativa en la disponibilidad condicionada por la actividad industrial que los genera.

Por otra parte, los residuos de industrias agrícolas, proceden de aquellas cuya actividad esta relacionada con el aceite de oliva, conservera, frutos secos, etc. En general, estos residuos tienen un origen muy variado. También existe otro conjunto de residuos con un alto grado de humedad que son destinados a la alimentación animal.

Los problemas más destacados de este recurso son: la disponibilidad limitada del recurso, la ausencia de pretratamientos de adecuación del recurso.

**Residuos ganaderos.** Como es sabido, el estiércol producido a partir de la actividad ganadera ha sido utilizado tradicionalmente como fertilizante de los cultivos. El problema aparece cuando todos estos residuos ganaderos no se pueden aprovechar para fertilizar los campos y se produce una acumulación de los mismos. Los residuos sólidos formados por la mezcla de las deyecciones y el material de la cama del ganado se le denomina estiércol, mientras que los residuos líquidos que incluyen las deyecciones y el agua de limpieza y arrastre se les conoce como purines. Estos últimos son los que constituyen un grave problema cuando no se pueden utilizar como abono de los campos. La utilización energética mas generalizada de los residuos ganaderos es la digestión anaerobia, produciendo biogás, y así, aprovechar y eliminar la gran cantidad de purines, constituyendo esta energía un aporte económico que rebaja los costes de la depuración.

**Residuos urbanos.** Dentro de este grupo podemos distinguir entre los *Residuos sólidos urbanos* (RSU) y las *aguas residuales* o residuos líquidos, que son evacuados a través de las alcantarillas. Los RSU tiene una composición muy heterogénea y variable que dependen de múltiples factores tales como el clima, la época del año, el nivel económico y los hábitos alimentarios de la población. Respecto a la utilización energética de estos RSU podemos decir que la técnica más empleada para generación de energía es la incineración de la fracción orgánica tras un proceso de separación de los distintos componentes, en metales vidrios, y material inerte.

Referente a las aguas residuales estas contienen un porcentaje de materia orgánica fermentable, con el inconveniente de que dicha materia se encuentra muy diluida, además de llevar las aguas de arrastre y limpieza doméstica y las de lluvia arrastradas por el alcantarillado. El proceso de depuración de las aguas residuales consiste en la

separación de la materia orgánica del agua, y así verter esta agua no contaminada a los cauces fluviales. El residuo sólido que se obtiene, denominado fangos, se le aplica un tratamiento anaeróbico para producir biogás, o secado para generar compost o para ser incinerado en plantas de generación de energía, con su consiguiente minora de costes.

**Cultivos energéticos.** Estos cultivos van destinados específicamente a la producción de materiales combustibles. En el ámbito nacional destacan, fundamentalmente, el cardo, el sorgo y la colza etiope. Este tipo de cultivo puede ser leñoso o herbáceo, siendo una alternativa a los cereales extensivos. La principal característica de estos cultivos son una lata productiva, el requerimiento de maquinaria de uso agrícola común, el hecho de que no contribuyan de manera sensible a la degradación del suelo, presentar un balance energético positivo y la posibilidad de recuperar fácilmente las tierras después de finalizado el cultivo energético.

Además de los cultivos mencionados anteriormente, puede incluirse el uso de otros cultivos leñosos como los chopos, aunque estos están limitados a zonas de regadío. También se puede destacar el eucalipto como leñoso energético, condicionado al mismo tiempo a las zonas de secano, variando la especie según donde se ubique dicho cultivo.

Los problemas más destacados de este recurso son: la necesidad de un marco legislativo y de ayudas, los altos costes que comprometen la rentabilidad de su cultivo, la actividad en la se de demostración (proyectos piloto) y, desde el punto de vista de la aplicación energética, su elevado precio y volumen de inversión asociado.

#### ***AI.1.1.5.3. Aspectos logísticos***

La problemática ligada a la gestión del recurso es un punto importante a destacar, siendo los aspectos más relevantes la recogida del recurso y la adecuación de sus características de granulometría, densidad y humedad para el uso energético, unidos a la logística de suministro a los consumidores potenciales. Como se comentó en apartados anteriores, la biomasa se genera a partir de residuos de diferente tipo, con lo que presentan particularidades diferentes en relación a los aspectos de recogida, adecuación y logística. En lo referente a la **Recogida del recurso**, las masas forestales españolas presentan características especiales que repercute en un elevado coste en mano de obra, y en una difícil mecanización de estos procesos. A su vez esto provoca un aumento en el precio en la adquisición de estos residuos para su fin energético. Similares circunstancias ocurren en el ámbito de los cultivos energéticos, donde es necesario una maquinaria adaptada para tal fin.

Un aspecto fundamental para asegurar un desarrollo fiable de los proyectos de valorización energética es la **Adecuación del recurso a la aplicación energética** a la que va destinado. Con ello se pretende adaptar el recurso a unas características de humedad, granulometría y densidad óptimas para la aplicación energética, que, generalmente, suelen ser labores trituración para los cultivos energéticos y de astillado y compactación para el resto de residuos.

Uno de los principales obstáculos con el que se encuentra el mercado de la biomasa actualmente es disponer con regularidad, calidad y a un precio aconsejable el recurso

dichos fines energéticos, lo que se denomina la **Logística de suministro**. Para superar esta situación se debe crear centros de distribución de la biomasa, de tal forma que se realicen contratos de suministro a largo plazo entre suministradores y consumidores de biomasa. Garantizar el suministro debe ser uno de los principales puntos destacados durante el desarrollo de un proyecto de aprovechamiento energético de la biomasa, así como en la parte de tecnologías, el sobrecoste de los equipos y los bajos rendimientos de transformación (utilizando caldera-turbina con ciclo de vapor ) unidos a la necesidad de almacenamiento, manejo y mantenimiento de las instalaciones.

#### *AI.1.1.5.4. Aspectos medioambientales*

El uso energético de la biomasa dentro de un esquema sostenible de producción del recurso supone una actividad altamente beneficiosa para el medioambiente. Esto ocurre tanto en la fase de producción del recurso como en la fase de transformación energética del mismo.

En la fase de **producción** del recurso combustible, uno de los efectos más beneficiosos es la disminución de riesgo de incendio y plagas forestales asociado a la gestión del residuo forestal, y la disminución de vertido y riesgos ambientales derivados de la gestión de residuos industriales tanto agrícolas como forestales. Referente a los cultivos energéticos, los riesgos contaminantes por la escasez de laboreo se minimizan.

Respecto a las emisiones a la atmósfera de las instalaciones de aprovechamiento energético de la biomasa en la fase de **aplicación**, se encuentran en cantidades inapreciables los elementos nocivos (azufre, cloro, etc.) y el balance de las emisiones de CO<sub>2</sub> se compensan al emitirse a la atmósfera una cantidad de carbono equivalente a la fijada por la biomasa durante su formación. Con el fin de cumplir el compromiso de nuestro país con los acuerdos internacionales de reducción de emisiones de gas de efecto invernadero, el uso de la biomasa con fines energéticos cobra un papel importante por el ahorro de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

#### *AI.1.1.5.5. Aspectos económicos*

En primer lugar debemos hacer la distinción entre aplicaciones térmicas y eléctricas, existiendo mercados específicos para el uso térmico doméstico, el uso térmico industrial, la generación eléctrica a partir de biomasa y las tecnologías de co-combustión. Las tecnologías de uso térmico en el sector industrial han alcanzado un elevado grado de madurez en España, esperando que ocurra lo mismo con el resto de las tecnologías.

Los costes de inversión y los gastos de explotación también varían considerablemente dependiendo del tipo de tecnología a utilizar y de su grado de madurez. Referente a los gastos, el principal es la compra de biomasa como combustible, añadiendo el transporte y posibles tratamientos para adecuación a la instalación y usos, como el secado o la peletización. A continuación se van a explicar brevemente los aspectos económicos más relevantes de cada aplicación.

**Plantas de tratamiento de biomasa.** Como ya se menciona anteriormente, la característica principal de la biomasa es su heterogeneidad. No todos los biocombustibles

que se utilizan necesitan el mismo tipo de tratamiento para su uso, ni tienen la misma calidad. Podemos destacar los tratamientos que se utilizan comúnmente como son la trituración y el astillado, además de aplicar en ocasiones procesos de secado, una molturación posterior del producto astillado, y un proceso de peletización cuando se busca un producto de mayor calidad.

**Aplicaciones térmicas de la biomasa.** Los costes de inversión dependen del tipo de aplicación debido a las distintas necesidades del usuario final de la energía. Estas diferencias hacen que se eleven los costes dependiendo del producto final, por ejemplo para usos térmicos domésticos que alcanzan los 282 €/kW. Los costes de explotación también sufren diferencias dependiendo de las tecnologías. En el caso de térmicas domésticas es necesario el uso de combustibles más limpios y fáciles de transportar, distribuir y manejar en la instalación, donde destacan los pelets que pueden llegar a alcanzar 160 €/t para calderas en viviendas unifamiliares. No ocurre lo mismo cuando se trata de aplicaciones térmicas industriales. La biomasa generada es propiedad del usuario y se utiliza con fines en la instalación. De este modo el precio oscila entre 0 y 35 €/t, si el mercado está estable y no se ve afectado por otro competidor. Otros gastos de explotación hacen referencia a superar las grandes distancias que existen entre las centrales hasta los consumidores (red de calefacción centralizada).

**Aplicaciones eléctricas de la biomasa.** En este apartado también podemos realizar la distinción dependiendo de la instalación, según se trate de generación eléctrica a partir de biomasa, de co-combustión de biomasa o carbón en centrales térmicas convencionales. El principal coste en este tipo de instalaciones es la biomasa, es decir, el elevado suministro de la misma implica una gran influencia del coste de transporte en el coste final de la biomasa. Dentro de las aplicaciones eléctricas de biomasa podemos distinguir las instalaciones *específicas de biomasa* y las de *co-combustión*. En las primeras, se requieren sistemas más complejos para permitir la combustión de todos los componentes de la biomasa, incluidos los volátiles. En este tipo de instalaciones para generación eléctrica con biomasa, la mayor demanda del recurso y las menores limitaciones en cuanto a la calidad de combustión dan lugar a importantes reducciones en los costes, siendo en los cultivos energéticos de 43 €/t y 31 €/t en residuos procedentes de cultivos agrícolas y forestales. Con lo que respecta a las aplicaciones eléctricas industriales, guardan similares características que los usos térmicos industriales citados anteriormente. La única diferencia podría radicar en que la planta de producción no sea propiedad de la empresa generadora del residuo, de modo que el precio de la biomasa podría subir sin unas condiciones adecuadas. La segunda opción es la instalación de co-combustión, que forman parte de la instalación convencional preexistente, lo que limita la inversión de los equipos destinados a preparar la biomasa para su inyección en la caldera de carbón. Las instalaciones de co-combustión se caracterizan por un mayor rendimiento de generación, por una mayor potencia instalada, y por una mayor demanda de biomasa que las anteriores.

Haciendo un **breve resumen** de lo expuesto anteriormente, la disponibilidad de biomasa en cantidad, calidad y precio, es un problema común a la hora de abordar cualquier proyecto energético debido, principalmente, a la ausencia de un mercado del recurso biomásico. Construir dicho mercado supone la necesidad de resolver el problema de la logística y adecuación para el uso energético así como de disponer de los mecanismos

contractuales que permitan establecer relaciones estables, reguladas y a largo plazo entre suministradores y transformador de la biomasa.

---

**ANEXO II**

**APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA SIG EN LAS  
PROVINCIAS DE VALENCIA, CIUDAD REAL Y LUGO**

---





**AII.1. ANÁLISIS DE DISPERSIÓN Y PRODUCCIÓN BIOMÁSICA ZONAL AGRÍCOLA Y FORESTAL**

**AII.1.1 Obtención de la biomasa agrícola teórica y disponible**

Para obtener la biomasa generada por cada especie agrícola es necesario realizar un tratamiento tanto a nivel cartográfico (especies agrícolas) como a las bases de datos facilitadas por el Ministerio de Agricultura. Para obtener a partir de la cartografía agrícola la biomasa tanto teórica como disponible en la zona de estudio se he llevado a cabo la siguiente metodología prácticamente en su totalidad automatizada.

- Realizar la unión de la cartografía que viene dividida por la hojas de la cuadrícula oficial de cada provincia. De este modo obtenemos una cartografía continua del territorio. Desglosar el campo “codigo”, tal y como se muestra en la tabla 3, en la ocupación por cada especie agrícola y por cada polígono para poder aplicar los coeficientes residuales.

FID	Shape	HOJA	CODIGO	U50	SC
0	Polygon	589	(QI={80 }QL={10 }JTH={10 }){50}	16	11
1	Polygon	589	LB	2	0
2	Polygon	589	(QI={80 }QL={10 }JTH={10 }){50}	16	11
3	Polygon	589	(QI={80 }QL={10 }JTH={10 }){50}	16	11
4	Polygon	589	(JTH(80:MB)QI={40 }){30}	16	11
5	Polygon	589	M	9	0
6	Polygon	589	LB	2	0
7	Polygon	589	M	9	0
8	Polygon	589	(QI={80 }QL={10 }JTH(10:MB) ){50}	16	11
9	Polygon	589	JTH( F30)	11	9
10	Polygon	589	LB	2	0
11	Polygon	589	JTH( F30)	11	9
12	Polygon	589	LB	2	0
13	Polygon	589	LB	2	0
14	Polygon	589	JTH( F30)	11	9
15	Polygon	589	JTH( F30)	11	9
16	Polygon	589	M	9	0
17	Polygon	589	JTH( F30)	11	9
18	Polygon	589	M	9	0
19	Polygon	589	JTH( F30)	11	9

Para abordar la cuestión de la cuantificación de la biomasa generada en un área, se debe hacer la distinción entre biomasa teórica y biomasa disponible, tanto de la biomasa agrícola como forestal. Para obtener dicha cuantificación e identificación de biomasa se utilizan principalmente: *Mapa de Cultivos y aprovechamientos de España* de donde podemos conocer la ocupación de los grupos de especie clasificados en: cultivos herbáceos, cultivos leñosos y otros cultivos.

La *Biomasa Teórica Total* se define como la producción anual de residuos tanto agrícolas, forestales y de cualquier otro tipo generados en una región. Para la obtención de la Biomasa teórica es necesaria la aplicación de unos *Coefficientes de generación superficial de Residuos* que se asignan dependiendo del tipo de cultivo y cultivos energéticos (tabla 4). Por ello, los coeficientes mencionados se han de aplicar para calcular la biomasa teórica, según la fórmula de la ecuación 1.

ESPECIES AGRÍCOLA	COEFICIENTES RESIDUALES( t/ha)
Arroz	7,53
Trigo	4,80
Cebada	1,99
Avena	1,50
Alfalfa	2,00
Maiz	15,00
Cereal genérico	2,00
Genérico	0,5
Naranja dulce	4,00
Viñedo	2,50
Olivo	2,50
Mandarino	4,00
Limonero	4,00
Manzana	4,00
Pera	4,00
Albaricoque	1,24
Cereza	1,93
Melocotón	3,72
Almendra	1,74
Leñoso genérico	1,00
Cultivos forzosos	0,5
Otros cultivos	1,00
Huerta	1,5

Tabla 45. Coeficientes residuales para cada especie agrícola

En este tipo de estudios la superficie de cada cultivo es un dato fundamental el cual viene proporcionado como hemos visto anteriormente por el porcentaje de ocupación de cada especie. Junto con este dato, el **coeficiente residual** (t/ha) será lo que nos determina la biomasa teórica que se genera en la zona de actuación.

Los cálculos para conocer dicha biomasa se llevan a cabo mediante procesos semi-automáticos dentro del SIG. Para ello, debemos introducir los coeficientes de cada tipo de cultivo, conocer la superficie de cada cultivo y el porcentaje de ocupación de cada cultivo en cada polígono. Los coeficientes residuales para este estudio son los que se muestran en la tabla 4 para todas las provincias y especies agrícolas. La ecuación aplicada para el cálculo de la biomasa teórica, tal y como se ha explicado, de manera genérica es la siguiente:

$$Biomasa\ Teórica_N = \sum_i^j Area * Ocupación\ (\%) * CR \quad Ec. 49$$

siendo N la especie cultivada : Ab, Ag, Aj, An, Ar, Av, Ce, Cf, Ch, Ci, etc.

siendo *i, j* los polígonos con especies agrícolas.

siendo CR los coeficientes residuales para cada especie

Como se puede apreciar en la ecuación anterior, a la hora de calcular, tanto la biomasa teórica como la disponible, el área de cada polígono agrícola será un factor determinante. La ocupación se refiere al grado de presencia en porcentaje de cada especie agrícola, en comparación con las otras especies presentes en el mismo polígono. A continuación se muestra la superficie calculada a partir de la cartografía oficial para cada especie agrícola y para cada provincia.

ESPECIE AGRÍCOLA	VALENCIA (ha)	CIUDAD REAL (ha)	LUGO (ha)
ALGARROBO	21.802	-	-
ALMENDRO	47.788	2.909,04	17,27
AGUACATE	-	6,85	-
AVELLANO	44,4	-	31,45
ALBARICOQUE	7.504	-	-
CIRUELO	-	24,06	-
HIGUERA	1,74	-	-
PERAL	178,6	-	21,54
NISPERO	37,75	-	-
MELOCOTONERO	9.349,3	5,4	19,31
VIÑEDO	89.733,8	191.435,14	4.334,16
OLIVO	37.987,8	117.189,95	20,70
MANDARINO	64.761,71	-	-
MANZANA	40,30	-	211,7
CEREZA	181,82	-	2,7
PALMERA DATILERA	175,9	-	-
NARANJO	69.988,3	-	-
MANGO	52,5	-	-
GRANADO	8,97	-	-
ARROZ	16.450	-	-
C. HERBACEOS	9.843,8	99.780	1.269,61
HUERTA	12.252,5	2.831,60	785,7
<b>TOTAL:</b>	<b>388.824</b>	<b>414.182,04</b>	<b>6.645,42</b>

**Tabla 46. Superficie ocupada por cada especie agrícola (ha) en cada provincia de estudio**

La superficie total ocupada por especies agrícolas en la provincia de Valencia asciende a 388.824 hectáreas, donde entre las especies predominantes se encuentran el almendro, el viñedo, el olivo, el mandarino, el naranjo, el arroz y la huerta junto con cultivos herbáceos. Una mención especial requieren las tierras de labor por el uso de posibles cultivos energéticos en dichas tierras (ver más abajo explicación de la metodología aplicada para estimar la superficie y biomasa a partir de los cultivos energéticos). La superficie ocupada por esta especie es de 49.975 hectáreas.

La superficie total ocupada por especies agrícolas en la provincia de Ciudad Real asciende a 414.182,04 hectáreas, donde entre las especies predominantes se encuentran el viñedo, el olivo, y los cultivos herbáceos ocupando grandes superficies, y en menor medida el almendro y la huerta. Las tierras de labor ocupadas por este uso en esta provincia alcanzan elevadas cifras, concretamente 611.348,96 ha.

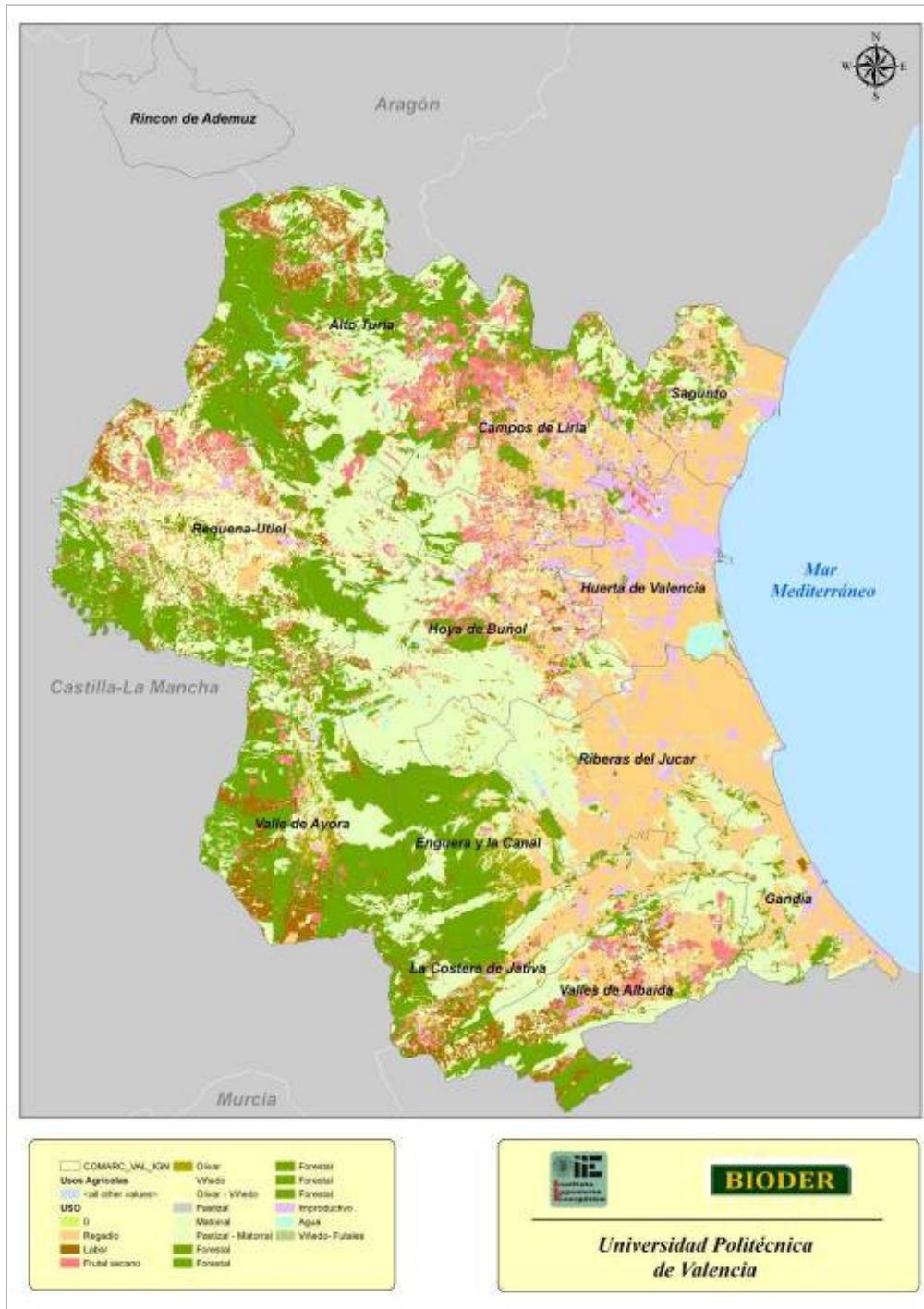


Figura 2. Usos agrícolas y zonas forestales en la provincia de Valencia

La superficie total ocupada por especies agrícolas en la provincia de Lugo asciende a 6.645,42 hectáreas, donde el viñedo y los cultivos herbáceos son las especies predominantes. La superficie ocupada por las tierras de labor en esta provincia también es una cantidad considerable, alcanzando 155.008,83 ha.

A continuación se muestra la distribución de los usos agrícolas y la ocupación de la zona forestales para la provincia de valencia, según los usos del suelo determinados por la codificación del Mapa de Cultivos aprovechamientos (Ministerio de Agricultura, pesca y Alimentación). Aquellos que se han marcado con negrita son los que se han utilizado en este estudio para conocer la superficie de ocupación de cada uno de ellos. Se han ignorado, por lo tanto, los usos: 7, 8, 9, 10, 17 y 18, los cuales no han intervenido en ningún cálculo.

<b>CODIFICACIÓN PARA LOS DIFERENTES USOS DEL SUELO</b>	
<b>1: REGADÍO</b>	<b>11: CONÍFERAS</b>
<b>2: LABOR SECANO</b>	<b>12: CHOPO Y ÁLAMO</b>
<b>3: FRUTAL</b>	<b>13: EUCALIPTO</b>
<b>4: OLIVAR SECANO</b>	<b>14: OTRAS FRONDOSAS</b>
<b>5: VIÑEDO SECANO</b>	<b>15: CONIFERAS-EUCALIPTO</b>
<b>6: VIÑEDO-OLIVAR</b>	<b>16: CONÍFERAS- FONDOSAS</b>
7: PRADOS NATURALES	17: IMPRODUCTIVO
8: PASTIZAL	18: IMPRODUCTIVO AGUA
9: MATORRAL	<b>19: VIÑEDO - FRUTALES</b>
10: PASTIZAL-MATORRAL	

**Tabla 47. Relación de usos empleados en el Mapa de cultivos**

Se debe tener en cuenta que la biomasa generada en una región no se recoge en su totalidad por razones de deficiente accesibilidad, estructura de la plantación, su difícil gestión u porque va destinada a otros usos diferentes, de modo que al aprovechamiento real de la biomasa con fines energéticos en una central de bioenergía, se le denomina Biomasa Disponible. Los cálculos para conocer dicha biomasa se llevan a cabo mediante procesos semi-automáticos dentro del SIG. Para ello, debemos introducir los coeficientes de cada tipo de cultivo, conocer su superficie y el porcentaje de ocupación de cada cultivo en cada polígono. El coeficiente de disponibilidad comarcal se ha establecido en 60% lo que representa que nos más de este porcentaje será destinado a fines energéticos. La ecuación aplicada para el cálculo de la biomasa disponible, tal y como se ha explicado, de manera genérica es:

$$Biomasa\ disponible_N = \sum_i^j Area * Ocupación\ (%) * CR * CE * CC \quad \text{Ec. 50}$$

siendo i, j los polígonos con especies agrícolas.

siendo CR los coeficientes residuales para cada especie agrícola

siendo CE los coeficientes de disponibilidad para cada especie agrícola

siendo CC los coeficientes de disponibilidad para cada comarca

Los coeficientes de disponibilidad a nivel de cada especie agrícola se divide en cuatro grupos: agrícolas leñosos, cereales genéricos, arroz y cultivos energéticos.

ESPECIE AGRÍCOLA	COEFICIENTES DE DISPONIBILIDAD
<b>Leñosos</b>	0,6
<b>Cereal genérico, huerta y herbáceos</b>	0,3
<b>Arroz y maíz</b>	0,50
<b>Labor (cultivos energéticos)</b>	1

**Tabla 48. Coeficientes de disponibilidad por cada especie agrícola**

Como anteriormente se ha mencionado, en este estudio se ha estimado cual sería el potencial de biomasa a partir Cultivos Energéticos. Estos cultivos no tienen una clasificación específica en la codificación general, pero según estudio previos se utilizan las denominadas tierras de Labor para dicho fin. En nuestro caso el 15% de dichas tierras irán destinadas a cultivos energéticos, predominantemente el cardo. Este cultivo genera un promedio de 15 t/ha, aumentando o disminuyendo dicho promedio según la pluviometría de la zona. En este caso particular se hará un especial tratamiento con la finalidad de calcular la biomasa generada a partir de dichos cultivos energéticos si se cultivará el 50% de las tierras de labor destinadas para cultivos energéticos (del 15% anteriormente mencionado).

En la provincia de Valencia, a partir de las la superficie ocupada por las Tierras de labor (49.975 ha), se podrían obtener un total de 52.196 toneladas de biomasa a partir de cultivos energéticos.

En la provincia de Ciudad Real, a partir de las la superficie ocupada por las Tierras de labor (611.348,96 ha), se podrían obtener un total de 687.767,59 toneladas de biomasa a partir de cultivos energéticos.

En la provincia de Lugo, a partir de las la superficie ocupada por las Tierras de labor (155.008,83 ha), se podrían obtener un total de 174.384,93 toneladas de biomasa a partir de cultivos energéticos.

A continuación se muestra la biomasa disponible (toneladas) calculada para cada comarca, destacando el tipo de cultivo en cada una de ellas.

PROVINCIA DE VALENCIA								
COMARCA	Albaricoque	Algarrobo	Almendro	Arroz	Cerezo	C. Herbáceos	Huerta	Labor
Alto Turia	79,5	918,2	8262,4	0,00	4,0	63,5	160,1	9269,9
Campos de Liria	25,5	3797,2	4037,5	0,00	4,3	891,1	77,9	1365,7
Enguera y la Canal	80,7	638,3	235,6	0,00	29,0	147,7	230,8	1177,8
Gandia	1,0	89,9	9,5	770,04	0,00	68,9	137,5	360,3
Hoya de Buñol	92,1	3441,2	3501,6	0,00	26,8	222,6	302,2	2299,3
Huerta de Valencia	1,8	774,2	117,6	9356,02	0,0	494,0	1376,8	157,7
La Costera de Jativa	573,8	28,5	1108,1	0,00	6,8	193,4	161,5	4384,9
Requena-Utiel	0,0	0,0	11965,5	0,00	4,5	262,8	165,4	12183,1
Riberas del Jucar	0,9	151,7	10,3	30008,64	7,7	421,7	293,0	132,9
Sagunto	0,0	596,8	387,3	0,00	26,5	194,5	133,7	27,9
Valle de Ayora	0,0	0,1	3573,5	0,00	1,4	145,1	373,2	12695,6
Valles de Albaida	3564,9	38,3	1638,3	0,00	65,9	159,9	100,5	7596,0
<b>Total:</b>	<b>4.420,4</b>	<b>10.475,0</b>	<b>34.847,5</b>	<b>40.134,7</b>	<b>176,9</b>	<b>3.265,3</b>	<b>3.513,0</b>	<b>52.196,5</b>
COMARCA	Peral	Mandarino	Melocotonero	Naranja	Olivo	Viñedo		
Alto Turia	16,59	310,06	514,02	750,48	3945,81	4825,90		
Campos de Liria	3,41	16076,80	306,09	20090,97	5855,73	1778,11		
Enguera y la Canal	0,00	933,95	67,59	2248,04	9742,80	145,05		
Gandia	0,00	13403,08	54,61	17916,96	281,23	15,59		
Hoya de Buñol	247,30	11191,36	4594,90	7915,21	3946,33	7637,23		
Huerta de Valencia	0,00	16268,96	263,86	13367,58	110,29	59,72		
La Costera de Jativa	0,00	7338,78	259,26	13436,72	3913,07	2125,73		
Requena-Utiel	0,00	0,00	0,00	0,06	3740,50	56521,41		
Riberas del Jucar	0,00	25259,21	6946,77	41744,90	776,10	22,43		
Sagunto	3,93	24542,66	0,00	5962,64	610,02	29,49		
Valle de Ayora	0,00	0,00	43,91	0,00	5523,09	927,67		
Valles de Albaida	78,12	504,04	2246,75	1377,09	7243,48	9685,46		
<b>Total:</b>	<b>349,35</b>	<b>115.828,90</b>	<b>15.297,76</b>	<b>124.810,65</b>	<b>45.688,46</b>	<b>83.773,80</b>		

Tabla 49. Biomasa comarcal agrícola por cultivos (Valencia)

PROVINCIA DE LUGO						
COMARCA	C. Herbáceos	Huerta	Labor	Manzano	Viñedo	Otros
Central	80,6	70,4	61081,8	187,2	162,9	
Costa	0,0	0,0	27555,0	0,0	0,0	
Montaña	12,8	15,5	14254,7	51,1	17,9	35,0
Sur	404,3	177,4	24106,5	142,7	4625,4	80,9
Terra Cha	0,0	0,0	46599,0	0,0	0,0	
<b>Total:</b>	<b>497,7</b>	<b>263,3</b>	<b>174.384,93</b>	<b>381,1</b>	<b>4.806,1</b>	<b>115,9</b>

Tabla 50. Biomasa comarcal agrícola por cultivos (Lugo)

PROVINCIA DE CIUDAD REAL							
COMARCA	Almendro	C. Herbáceos	Huerta	Labor	Olivo	Viñedo	Otros
Campo de Calatrava	398,6	10214,0	455,5	90610,9	28812,3	17250,8	0,0
Campos de Montiel	1114,7	1870,1	351,9	91501,3	34238,8	23828,8	0,0
Mancha	269,3	23149,	13,7	180133,8	25005,6	169869,3	45,1
Montes Norte	417,2	3763,0	75,2	60020,2	26622,8	2792,9	3,4
Montes Sur	17,9	148,7	29,2	3398,1	3758,2	32,7	0,0
Pastos	38,1	61,5	29,9	27570,8	13054,9	550,9	3,7
<b>Total:</b>	<b>2.256,0</b>	<b>39.206,7</b>	<b>955,6</b>	<b>453.235,3</b>	<b>131.492,7</b>	<b>214.325,7</b>	<b>56,0</b>

Tabla 51. Biomasa comarcal agrícola por cultivos (Ciudad Real)

#### *AIL.2. CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA AGRÍCOLA SEGÚN GRUPOS DE ESPECIES*

Se ha realizado la agrupación de cultivos según la tabla 6 para determinar la caracterización (humedad, Poder calorífico y la ceniza) de la biomasa procedente de residuos agrícolas que se gestiona en la planta de biomasa donde ésta será tratada y procesada. La tabla muestra los valores genéricos aplicados para cada uno de los grupos agrícolas generados tras la agrupación.

CULTIVO	HUMEDAD	PCS (MJ/KG SECO)	CENIZA (%SECO)
<b>Arroz</b>	0,3	16,7	15,00%
<b>Huerta</b>	0,5	17	5,00%
<b>Cítricos</b>	0,4	17,6	4,00%
<b>Frutales leñosos</b>	0,4	17,5	4,00%
<b>Olivar</b>	0,35	18,1	4,00%
<b>Viñedo</b>	0,4	18,3	4,00%
<b>Cultivos herbáceos</b>	0,25	17,4	6,00%
<b>Labor (cultivos energéticos)</b>	0,15	15,57	9,70%

Tabla 52. Valores genéricos de la caracterización de la biomasa agrícola



La muestra un ejemplo gráfico de la caracterización de la biomasa por comarcas (Humedad, Poder calorífico y ceniza), distribución y potencial energético de la biomasa generada para la provincia de Valencia a partir de los valores establecidos. Para la obtención de resultados se ha aplicado la siguiente formulación:

$$Humedad\ Pr\ omedio\ (\%) = \frac{\sum Biomasa_i * humedad_i}{\sum Biomasa} \quad \text{Ec. 51}$$

$$Poder\ Calorífico\ Pr\ omedio\ (Mj / Kg) = \frac{\sum Biomasa_i * (1 - humedad)_i * Poder\ Calorífico}{(1 - humedad) * \sum Biomasa} \quad \text{Ec.52}$$

$$Ceniza\ Pr\ omedio\ (\%) = \frac{\sum Biomasa_i * (1 - humedad)_i * Ceniza}{(1 - humedad) * \sum Biomasa} \quad \text{Ec. 53}$$

A partir de las toneladas de biomasa comarcales, de la humedad de cada especie agrícola y de su poder calórico es posible conocer la energía generada mediante la expresión:

$$Energía_{comarcal} = Biomasa(t) * (1 - humedad) * Poder\ calorico \quad \text{Ec. 54}$$

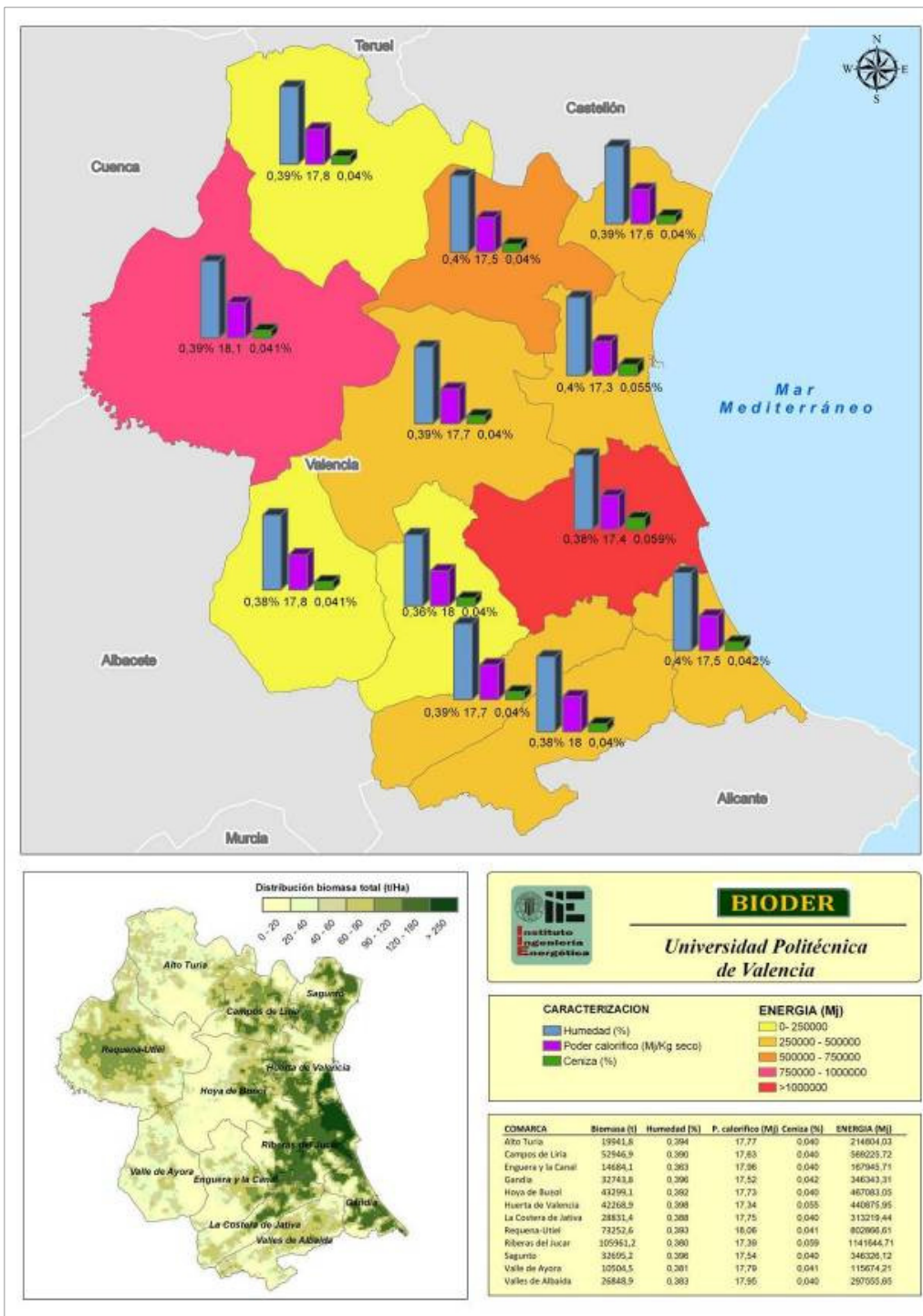
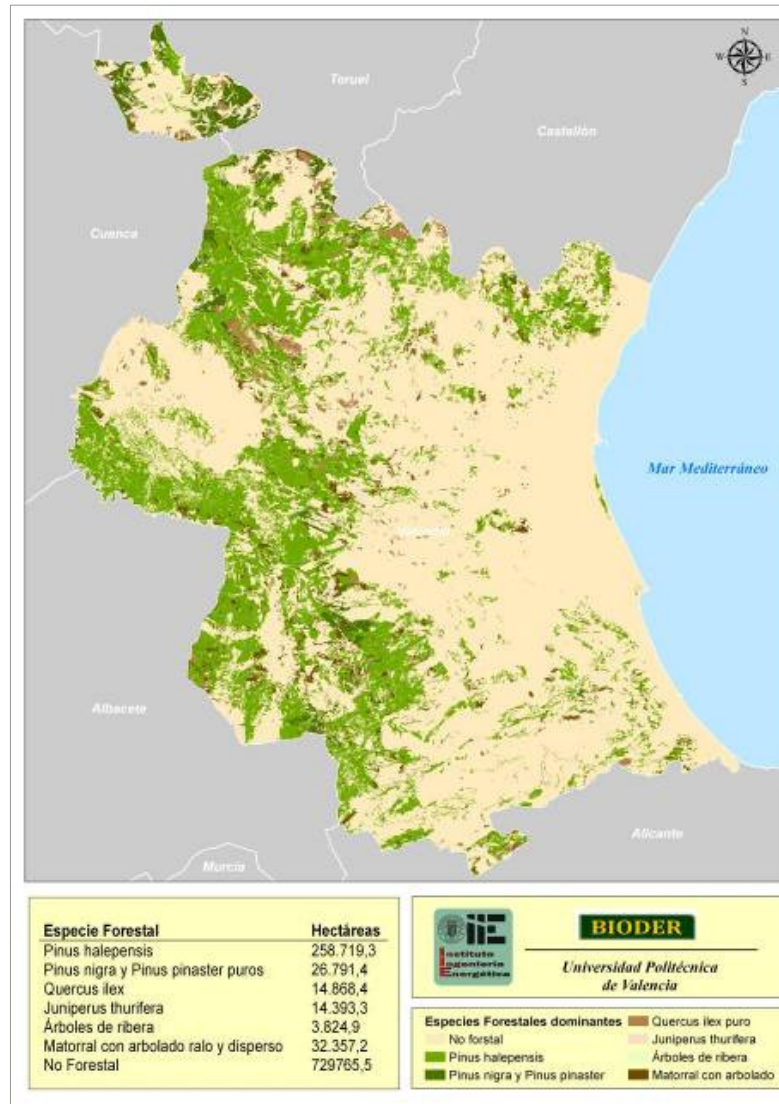


Figura 42. Caracterización, distribución y potencial energético de la biomasa en Valencia

**AII.3. OBTENCIÓN DE LA BIOMASA FORESTAL TEÓRICA Y DISPONIBLE**

La metodología desarrollada para la realización del IFN3 se basa fundamentalmente en la estimación de los parámetros bajo estudio mediante métodos estadísticos, a partir de una serie de parcelas de muestreo basada en la estratificación de las superficies forestales arboladas. Estos puntos de muestreo se corresponden con la malla kilométrica de la cartografía en proyección UTM, y se traducen en estadillos de los cuales se conoce detalladamente su posición, las características dasométricas, dendométricas, fisiografía de la parcela, etc. La figura 3 representa la distribución de las áreas forestales en la provincia de Valencia y la superficie que ellas ocupan según el IFN3.



**Figura 43. Áreas predominantes (ha) forestales en la Provincia de Valencia**

En primer lugar se realiza la transformación de los formatos de intercambio .e00 de ArcInfo a formato shapefile. Los ficheros originales utilizados para la obtención de la biomasa forestal para cada provincia son los correspondientes al Tercer Inventario Forestal Nacional (IFN3) facilitada por el Ministerio de Medio Ambiente. Junto con la cartografía del inventario forestal viene asociada una base de datos donde se detalla gran cantidad de información, en la mayoría de los casos por medio de una codificación, tales como la especie arbórea, la ocupación, el estrato, el estado, el volumen con corteza, la fracción de cabida cubierta, etc.

En la información alfanumérica que viene asociada a la cartografía, aparecen un gran número de campos, de los cuales se han seleccionado los mas relevantes en cada polígono forestal:

- **Tipo de estrato (Tipoestr):** Identifica distintos usos del suelo que puedan aparecer. Para el uso forestal, las distintas estructuras de vegetación que lo ocupan
- **Estrato:** Valor del estrato\* al que pertenece según el proceso del IFN3
- **Nivel 1 (N1):** Nivel 1 de la clasificación del IFN3 de niveles de usos del suelo
- **Nivel 2 (N2):** Nivel 2 de la clasificación del IFN3 de niveles de usos del suelo
- **Nivel 3 (N3):** Nivel 3 de la clasificación del IFN3 de niveles de usos del suelo
- **Especie1 (Esp1):** Especie arbórea presente en la tesela
- **Ocupacion1(O1):** Grado de presencia en porcentaje de la Esp1, en comparación con las otras especies presentes en la tesela
- **Estado1 (E1):** Determina las fases de desarrollo de la Esp1
- **Especie2 (Esp2):** Especie arbórea presente en la tesela
- **Ocupacion2 (O2):** Grado de presencia en porcentaje de la Esp2, en comparación con las otras especies presentes en la tesela
- **Estado2 (E2):** Determina las fases de desarrollo de la Esp2
- **Especie3 (Esp3):** Especie arbórea presente en la tesela
- **Ocupacion3 (O3):** Grado de presencia en porcentaje de la Esp3, en comparación con las otras especies presentes en la tesela
- **Estado3 (E3):** Determina las fases de desarrollo de la Esp3
- **Fracción cabida cubierta (FCC):** Representa la fracción de cabida cubierta (entre 0 y 100%) del conjunto de las especies de la cubierta arbórea, como porcentaje de suelo cubierto por la proyección de todas las copas

Los datos pertenecientes a la cartografía proporcionan gran cantidad de información de cada polígono, pero para calcular la biomasa forestal necesitamos otros parámetros. Estos parámetros se encuentran en otra base de datos (designada según el nombre de la provincia) la cual contiene como información relevante:

- **Estrato:** Caracterizador del tipo de vegetación arbórea del recinto, según la/s especie/s presentes, sus ocupaciones respectivas, sus estados de masa y fracción de cabida cubierta arbórea, con objeto de crear grupos estadísticamente homogéneos. Estos estratos son distintos para cada unidad, es decir, para cada provincia.
- **Especie:** Código de la especie

A partir del **Volumen Con Corteza**, que es la clave junto con el **Estrato** y el **Número de Pies** podremos calcular la biomasa forestal. De modo que es necesario identificar cada polígono con estas características y añadirlas a la información geográfica mediante una unión de tablas a partir del campo común único, el "Estrato". Una vez reestructurada la

información en una única base de datos, asociada a la información cartográfica, con la información mencionada es posible aplicar las ecuaciones, que a continuación se explican, para el cálculo de la biomasa forestal. Conociendo estos valores para cada uno de los polígonos forestales ya podemos calcular la biomasa forestal de cada uno de ellos, mediante la ecuación:

$$Biomasa\ Forestal = S_i * (VCC * Coef_{VCC} + NPies * Coef_{NPIES}) \quad \text{Ec. 55}$$

siendo VCC el Volumen maderable con corteza (m3)  
 siendo Coef.VCC un coeficiente residual para cada especie  
 siendo NPies el número de pies  
 siendo Coef.NPIES un coeficiente  
 siendo S el área de cada polígono

Para obtener la biomasa forestal a partir de la ecuación anterior se han considerado los valores que se muestran en las siguientes tablas, los cuales corresponden a las especies predominantes en cada provincia y sobre las cuales se ha calculado la biomasa forestal. En la siguiente tabla se muestra la superficie de cada especie forestal predominante en cada provincia.

ESPECIE FORESTAL	BIOMASA FORESTAL VALENCIA (t)	BIOMASA FORESTAL CIUDAD REAL(t)	BIOMASA FORESTAL LUGO (t)
Pinus Sylvestris	-	1335,1	50719,2
Pinus halepensis	83102,6	-	-
Pinus nigra	3512,7	-	-
Pinus pinaster	2713,6	2455,5	24185,7
Pinus radiata	-	-	18264,2
Quercus faginea	-	346,7	-
Quercus ilex	546,3	3692,4	-
Quercus robur	-	-	61730,6
Quercus pyrenaica	-	348,7	18548,8
Árboles de ribera	-	-	-
Eucaliptus globulus	-	1430,4	245397,2
Castanea sativa	-	-	4456,4
Populus canadensis	1951,5	20646,3	-
<b>Total:</b>	<b>91.826,8</b>	<b>28.920,1</b>	<b>423.18.845,9</b>

**Tabla 53. Biomasa forestal disponible en cada provincia y por especie**

Resumiendo, de la tabla anterior se desprende que Lugo es la provincia que por su mayor ocupación de suelo forestal, producirá una mayor cantidad de biomasa disponible. A continuación se muestran los resultados obtenidos para cada comarca y la cantidad de biomasa de origen forestal según la especie. Hay que resaltar las más de 80.000 toneladas de *Pinus halepensis* en la provincia de Valencia, las casi 250.000 toneladas de *Eucalipto* en Lugo, y las cerca de 20.000 toneladas de *Populus canadiense* en Ciudad Real.

PROVINCIA DE VALENCIA					
COMARCA	PINUS HALEPENSIS	PINUS NIGRA	PINUS PINASTER	QUERCUS ILLEX	POPULUS CANADIENSE
Alto Turia	16333,7	1278,7	943,3	211,5	308,1
Campos de Liria	4316,4	66,6	59,9	24,4	75,4
Enguera y la Canal	7024,7	469,8	341,3	32,4	76,4
Gandia	1379,4	70,5	50,5	6,2	0,0
Hoya de Buñol	4180,2	219,4	173,3	23,2	118,3
Huerta de Valencia	543,2	3,9	4,3	1,5	6,9
La Costera de Játiva	3374,5	26,8	29,0	10,5	86,7
Requena-Utiel	26039,2	765,2	606,3	138,4	386,0
Riberas del Júcar	898,2	0,6	4,1	4,1	23,8
Sagunto	3324,8	3,4	14,9	15,8	0,7
Valle de Ayora	12619,4	515,4	409,9	52,2	393,5
Valles de Albaida	3068,4	91,9	76,4	25,9	475,3
<b>Total:</b>	<b>83.102,6</b>	<b>3.512,7</b>	<b>2713,6</b>	<b>546,3</b>	<b>1.951,5</b>

Tabla 54. Biomasa forestal disponible (toneladas) en cada comarca y por especie (Valencia)

PROVINCIA DE LUGO							
COMARCA	PINUS SYLVESTRIS	PINUS PINASTER	PINUS RADIATA	QUERCUS ROBUR	QUERCUS PYRENAICA	EUCALIPTU GLOBULUS	CASTANEA SATIVA
Central	2321,7	4597,7	6392,7	20333,8	2894,4	17805,4	1188,2
Costa	1961,4	6334,7	2765,3	5313,3	869,8	193618,3	7,8
Montaña	31885,5	1826,1	1952,5	12754,8	9334,2	4044,5	552,8
Sur	8249,9	7542,2	1768,5	12475,4	3608,3	15714,3	2651,3
Terra Cha	6300,4	3885,1	5385,0	10853,1	1841,9	14214,6	56,2
<b>Total:</b>	<b>50.719,2</b>	<b>24.185,7</b>	<b>18.264,2</b>	<b>61.730,6</b>	<b>18.548,8</b>	<b>245.397,2</b>	<b>4.456,4</b>

Tabla 55. Biomasa forestal disponible (toneladas) en cada comarca y por especie (Lugo)

PROVINCIA DE CIUDAD REAL							
COMARCA	PINUS SYLVESTRIS	PINUS PINASTER	QUERCUS PYRENAICA	QUERCUS FAGINEA	QUERCUS ILEX	EUCALIPTUS CAMALDULENSIS	POPULUS CANADENSIS
Campo de Calatrava	331,78	226,92	4,08	13,41	467,22	135,19	1897,60
Campos de Montiel	21,25	5,86	22,22	29,76	1024,35	50,65	741,79
Mancha_	173,18	50,33	24,77	33,68	516,73	453,78	6632,46
Montes Norte	386,27	1497,93	140,96	129,02	800,72	532,13	7702,14
Montes Sur	70,19	95,45	46,81	42,61	292,57	56,08	801,12
Pastos	352,45	579,07	109,84	98,23	590,84	202,54	2871,21
<b>Total:</b>	<b>1.335,13</b>	<b>2.455,55</b>	<b>348,69</b>	<b>346,71</b>	<b>3.692,42</b>	<b>1.430,39</b>	<b>20.646,32</b>

Tabla 56. Biomasa forestal disponible en cada comarca y por especie (Ciudad Real)

**Especies predominantes en la Provincia de Valencia**

- Especie 24: Pinus halepensis
- Especie 25: Pinus Nigra
- Especie 26: Pinus pinaster
- Especie 38: Juniperus Thunifera
- Especie 45: Quercus Ilex
- Especie 50: Mezcla de arboles de ribera
- Especie 67: Ceratonia Siliqua
- Especie 99: Otras frondosas
- Especie 258: Populus canadensis

Estrato	ESPECIE ARBÓREA								
	024	025	026	038	045	050	067	099	258
01	67,9	0,01	0,3	0,02	0,1	0,07	0,2	0,07	
02	31,1	0,009	0,1	0,01	0,2	0,01	0,1	0,02	
03	12,3		0,2	0,03	0,0		0,04	0,06	
04	0,9	0,02	0,1		0,04		0,01		
05	9,3	24,9	24,5	1,1	0,2				
06	1,8	3,4	7,2	0,7	0,3			0,05	
07	5,4	0,1	1,2	0,09	6,5	0,2	2,1	0,4	
08	0,6	0,07	0,4	0,1	0,7		0,08		
09	0,2	0,05	0,04	1,6	0,04		0,03		
10	1,4			0,07		8,4		0,1	39,0
11	3,4	0,08	0,4	0,04	0,2		0,4	0,1	

Tabla 57. Volumen Con Corteza para cada especie a partir del estrato, Valencia

Estrato	ESPECIE ARBÓREA									
	024	025	026	038	045	050	067	099	258	
01	605,5	0,07	1,3	1,2	3,1	0,02	2,8	2,2		
02	306,4	0,04	0,9	1,0	7,3	0,2	1,6	1,4		
03	121,1		1,6	2,4	4,7		1,2	2,3		
04	32,7	1,2	2,3		2,7		0,05			
05	54,1	196,5	169,8	26,7	14,2					
06	16,8	45,1	62,9	14,0	21,4			0,07		
07	44,3	2,4	6,6	4,9	282,5	0,08	20,5	19,06		
08	7,5	0,7	2,2	1,5	44,9		1,1			
09	1,3	0,7	0,1	35,6	2,8		0,2			
10	9,3			1,0		84,7		4,5	134,4	
11	32,1	3,2	3,2	0,5	3,3		6,1	8,8		

Tabla 58. Número de Pies para cada especie a partir del estrato en la provincia de Valencia

### Especies predominantes en la Provincia de Lugo

Especie 21: Pinus sylvestris

Especie 26: Pinus pinaster

Especie 28: Pinus radiata

Especie 41: Quercus robur

Especie 43: Quercus pyrenaica

Especie 54: Alnus glutinosa

Especie 57: Salix spp. (sauce)

Especie 61: Eucaliptus globulus

Especie 72: Castanea sativa (castaño)

Especie 73: Betula spp. (Abedul)

Especie 99: Otras frondosas

Estrato	ESPECIE ARBÓREA											
	021	026	028	041	043	054	057	061	072	073	099	
01	133,3	16,3	1,5	1,04	0,8					0,6	0,3	
02	1,3	157,7	2,2	1,2	0,3		0,2	1,8	0,4	0,4	0,03	
03		48,5	4,8	6,0	0,8		0,4	26,7	2,2	1,1	0,05	
04	0,10	112,1	16,5	14,1	2,1	0,4	0,4	52,1	4,3	4,6		
05	0,40	0,7	2,4	0,5	0,1			0,1	0,6	0,07		
06		1,5	0,1	1,3		0,2	0,09	0,1				
07	0,025	4,6	59,2	3,1	2,3			1,08	1,2	1,6	0,03	
08		8,9	199,1	9,6	2,8	0,4	0,8	4,9	4,07	3,2	0,09	
09		2,9	0,2	90,2	1,7	0,1	0,1	0,09	2,0	3,9	0,8	
10	0,15	3,2	0,4	27,2	10,1		0,3	1,9	9,6	8,7	0,3	
11		2,2	0,5	68,3	10,5	0,8	0,6	1,9	19,2	18,7	2,1	
12		2,4	0,9	3,4	51,7	0,1	0,2		19,2	1,4	1,1	
13		1,2	0,6	10,7	0,8	1,5	4,3	5,6	70,3	21,8	2,9	
14	0,15	4,5	0,1	0,9			0,09	96,2	0,9	0,2	0,06	
15		9,7	0,5	0,5		0,4	0,4	179,7	1,8	0,2	0,01	
16	0,04	1,9	0,2	0,5	0,3		0,2	0,5	0,4	0,5	0,1	
17		0,6	0,4	8,8	1,5	33,1	17,6	2,8	11,7	11,1	3,3	

Tabla 59. Volumen Con Corteza para cada especie a partir del estrato, Lugo



Estrato	ESPECIE ARBOREA										
	021	026	028	041	043	054	057	061	072	073	099
01	907,6	52,8	8,003	14,4	6,2					1,8	4,5
02	9,3	659,2	17,101	22,8	3,3		1,4	4,656	5,1	7,7	3,1
03		185,7	34,675	64,0	7,6		3,1	148,442	19,9	16,0	1,1
04	0,8	391,4	84,709	98,2	17,0	3,5	3,2	240,733	19,5	60,4	
05	15,2	5,7	65,937	6,1	0,0			3,316	5,4	1,4	
06		63,0	3,631	7,1			2,9	0,5	2,947		
07	1,5	41,4	521,627	18,2	32,7			7,491	3,6	18,5	0,3
08		41,4	789,896	65,9	5,9	5,4	6,2	15,112	30,7	35,1	0,5
09		7,5	0,406	389,3	10,3	0,4	1,0	0,122	8,7	39,0	9,2
10	1,1	5,4	1,652	175,6	56,1		2,4	3,743	47,2	83,7	4,5
11		3,8	1,970	314,8	60,9	4,3	4,1	13,150	74,4	176,7	44,7
12		6,4	5,579	25,3	407,1	0,3	0,3		50,5	18,5	23,2
13		2,3	5,841	55,4	10,2	9,4	20,8	22,811	189,0	210,7	45,4
14	0,1	38,9	1,490	4,9			0,8	636,351	8,6	1,7	1,1
15		80,5	3,947	3,2		1,6	3,9	959,696	19,9	1,6	0,8
16	0,4	4,5	1,937	2,4	4,6		1,7	5,802	1,5	4,4	2,7
17		4,1	1,613	32,6	4,9	216,6	89,4	27,639	35,5	103,1	39,2

Tabla 60. Número de Pies para cada especie a partir del estrato en la provincia de Lugo

**Especies predominantes en la Provincia de Ciudad Real**

- |                               |                                      |
|-------------------------------|--------------------------------------|
| Especie 23: Pinus sylvestris  | Especie 50: Mezcla de árboles        |
| Especie 26: Pinus pinaster    | Especie 62: Eucaliptus camaldulensis |
| Especie 43: Quercus pyrenaica | Especie 68: Arbutus unedo            |
| Especie 44: Quercus faginea   | Especie 99: Otras frondoasas         |
| Especie 45: Quercus Ilex      | Especie 237: Juniperus oxycedrus     |
| Especie 46: Quercus suber     | Especie 258: Populus canadensis      |

Estrato	ESPECIE ARBOREA											
	023	026	043	044	045	046	050	062	068	099	237	258
01	27,1	0,8		0,04	0,4	0,1		0,2	0,06		0,1	
02	1,3	140,9	0,1	0,1	0,0	0,5		0,07	0,06		0,01	
03	0,2	62,1		0,2	0,1	0,3			0,01			
04	13,8	28,9	0,5	1,3	0,7	1,6			0,07			
05	0,9	0,			0,5	0,1						
06			1,6	0,9	1,7	1,3			4,1		0,9	
07	0,02	0,2	7,5	4,9	2,6	3,8	0,3		0,3	0,4	0,02	
08				0,2	11,2	0,06	0,07		0,09	0,6	0,4	
09					4,4	0,03				0,1	0,4	
10	0,01	0,01	0,04	0,06	1,04	0,06				0,0	0,04	
11				0,2	7,0	0,1				0,05	0,01	
12		0,1		0,04	3,3	0,02				0,04		
13	0,04			0,8	0,3		21,8	7,5		0,7		18,03
14		0,4		0,2	1,5	0,1			0,04	0,06	0,08	

Tabla 61. Volumen Con Corteza para cada especie a partir del estrato en Ciudad Real

	ESPECIE ARBOREA											
Estrato	023	026	043	044	045	046	050	062	068	099	237	258
01	349,2	3,2		1,0	18,6	0,5		1,4	4,1		4,4	
02	8,9	748,3	1,9	4,7	4,9	6,1		0,7	5,4		0,2	
03	6,5	416,6		8,1	8,	2,3			0,3			
04	130,6	159,4	9,7	32,6	40,3	14,7			6,5			
05	53,0	18,4			20,6	0,8						
06			34,7	32,1	101,5	9,2			286,5		28,1	
07	0,3	1,2	84,8	121,1	98,4	29,0	2,8		18,2	10,7	0,6	
08				3,3	393,0	0,3	0,01		8,0	27,2	15,1	
09					160,6	0,1				6,06	8,0	
10	0,8	0,3	1,8	0,2	70,4	0,3				0,8	1,8	
11				1,7	71,8	0,2				2,5	0,01	
12		0,1		0,2	22,8	0,05				2,9		
13	0,2			1,5	20,3		82,5	101,0		2,6		68,1
14		7,2		6,3	115,0	0,6			4,8	4,8	5,5	

Tabla 62. Número de Pies para cada especie a partir del estrato,Ciudad Real

Además de conocer los valores de Volumen con corteza (t/VCC(m3)-año) y el número de pies (t/pie-año) para cada provincia del estudio, es necesario también conocer los coeficientes que se aplican a cada especie forestal con el objetivo de conocer las toneladas de biomasa por hectárea. La siguiente tabla muestra dichos coeficientes, los cuales son comunes para todas las provincias:

	ESPECIE ARBOREA								
	021	023	024	025	026	028	038	041	043
VCC	0,018	0,006	0,008	0,006	0,006	0,006	0	0,008	0,008
NPP	0,0004	0,0004	0,0007	0,010	0,0004	0,0004	0	0	0

	ESPECIE ARBOREA								
	044	045	046	050	054	057	061	062	067
VCC	0,009	0,009	0	0	0	0	0	0	0
NPP	0	0	0	0	0	0	0,0046	0,0046	0

	ESPECIE ARBOREA					
	068	072	073	99	237	258
VCC	0	0	0	0	0	0
NPP	0	0	0	0	0	0,102

Tabla 63. Coeficientes respecto al VCC y al NP aplicados en las tres provincias

**AII.4. PUNTOS DE APORTACIÓN DE BIOMASA**

Para analizar la ubicación y dispersión geográfica de los residuos biomásicos anteriormente calculados de una manera continua, debemos asociar la biomasa calculada a unos puntos denominados **superficies de aportación**.

*Punto o superficie de aportación:* Se considerará la mínima unidad e información, tanto de origen (aportación de biomasa) como destino (posible ubicación de la planta). Este punto se identifica con el centroide de cada cuadrado que forma la malla regular. Cada centroide tiene asignado el valor de la biomasa disponible según los tipos de cultivo que éste encierra, además de otros. Cada km<sup>2</sup> encerrará diferentes tipos de cultivos, luego, el sumatorio de la biomasa disponible de cada tipo de cultivo en esa área, proporcionará la *Biomasa Disponible* por km<sup>2</sup>.

**AII.5. OPTIMIZACIÓN DE LA LOGÍSTICA Y EL TRANSPORTE PARA LA EVALUACIÓN Y PRE-SELECCIÓN DE LAS MEJORES UBICACIONES**

**AII.5.1. Determinación de las restricciones sociales y ambientales**

Las restricciones son unos elementos que se deben considerar para ubicar una instalación en la posición más adecuada. Estos elementos los denominaremos **Factores de la localización**. El análisis exhaustivo de la logística debe, además, tener en cuenta diversos factores, tanto naturales como artificiales, para evaluar la posibilidad de ubicar la planta de biomasa. Estos factores los podemos identificar como zonas de influencia determinadas a partir de una distancia mínima especificada donde no estará permitido localizar la instalación. Las restricciones que se aplicarán en el presente estudio se resumen en la siguiente tabla:

FACTORES DE LA LOCALIZACIÓN HABITUALES	ESPECIFICACIONES
Zonas Húmedas y lagos	Distancia de seguridad. Zona de influencia
Áreas Protegidas	Distancia de seguridad. Zona de influencia
Hidrografía	Distancia de seguridad. Zona de influencia
Aeropuertos	Distancia de seguridad. Zona de influencia
Pendiente	Pendiente recomendada para la instalación
Comunicaciones	Distancia de seguridad. Zona de influencia
Líneas eléctricas y conducciones (gas)	Distancia de seguridad. Zona de influencia
Áreas residenciales (alta densidad)	Distancia de seguridad. Zona de influencia
Áreas residenciales	Distancia de seguridad. Zona de influencia

**Tabla 64. Restricciones a aplicar para la ubicación de una central de bioenergía**

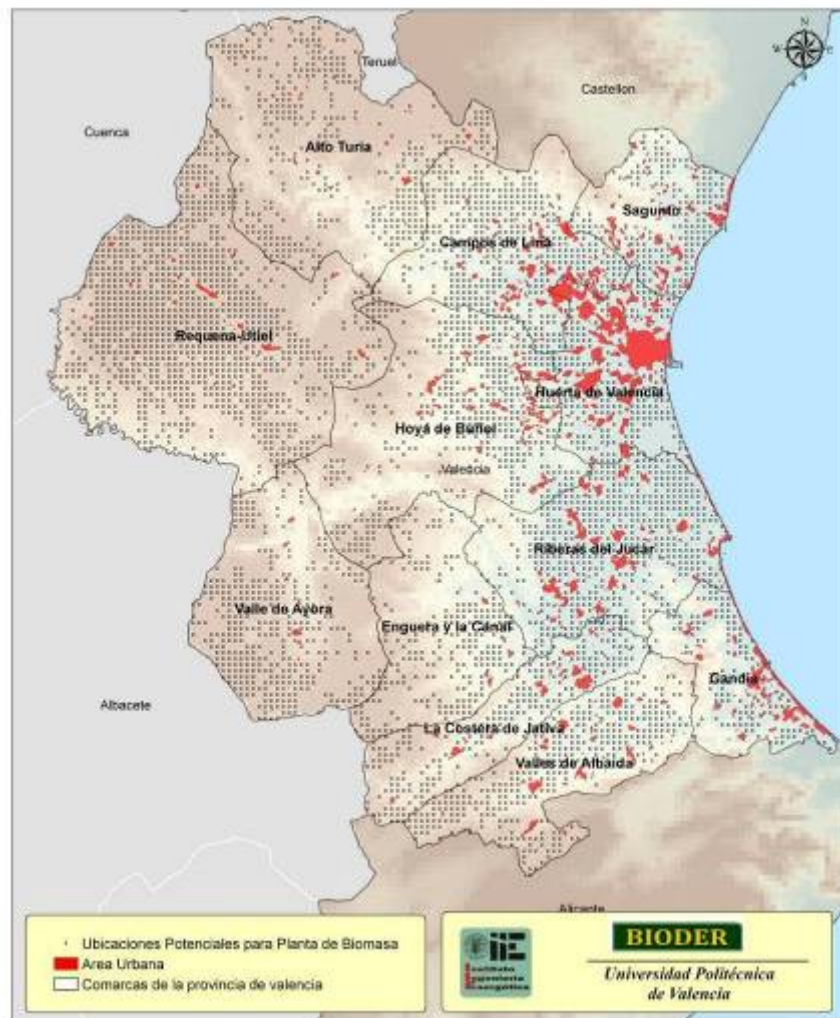


Figura 44. Ejemplo de la distribución de las ubicaciones potenciales en Valencia

***AII.6. ANÁLISIS DE LA RED DE TRANSPORTE. EVALUACIÓN DE TIEMPOS, DISTANCIAS Y COSTES DE TRANSPORTE.***

La localización e identificación de los recursos biomásicos y las ubicaciones potenciales para la instalación de una central de bioenergía va a permitir implementar una serie de algoritmos de cálculo de distancias, tiempos y costes de transporte en sus dos fases: **recogida de la biomasa y su distribución**. El objetivo es evaluar todas las posibles ubicaciones de la planta de biomasa desde el punto de vista de estos algoritmos de cálculo. Para llevar a cabo este apartado se ha utilizado una herramienta específica denominada Network Analyst (analista de redes) incluida en la aplicación cartográfica y también susceptible de ser automatizada, por medio de modelos simulando las fases de recogida y distribución, e implicando un gran número de elementos que forman dicho

análisis (vías de transporte, puntos de aportación de biomasa, ubicaciones potenciales de la planta, unidad de transporte, accesibilidad a las parcelas, centro del municipio, etc.).

En la zona de actuación (comarca) se parte de la consideración que cualquier punto válido, según las restricciones anteriormente citadas, es también válido como posible ubicación de la planta de bioenergía y será analizado en detalle en el proceso de optimización. Siguiendo con la metodología se pretende evaluar y calcular todas las combinaciones posibles entre los puntos considerados como orígenes y los puntos considerados como destinos, los cuales varían dependiendo de si se trata de la fase de recogida de la biomasa o de la de distribución. Se entiende por *combinación* la ruta o trayectoria existente entre un punto origen (x,y) y un punto destino (x, y), siendo estos diferentes para la fase de recogida y la de distribución como veremos más adelante. La figura 10 muestra una representación gráfica tomando como ejemplo una primera posible ubicación de una planta de biomasa (ubicación potencial: destino) y todos los orígenes de biomasa a los que el camión debería ir a recoger la biomasa compactada, utilizando las vías de transporte.

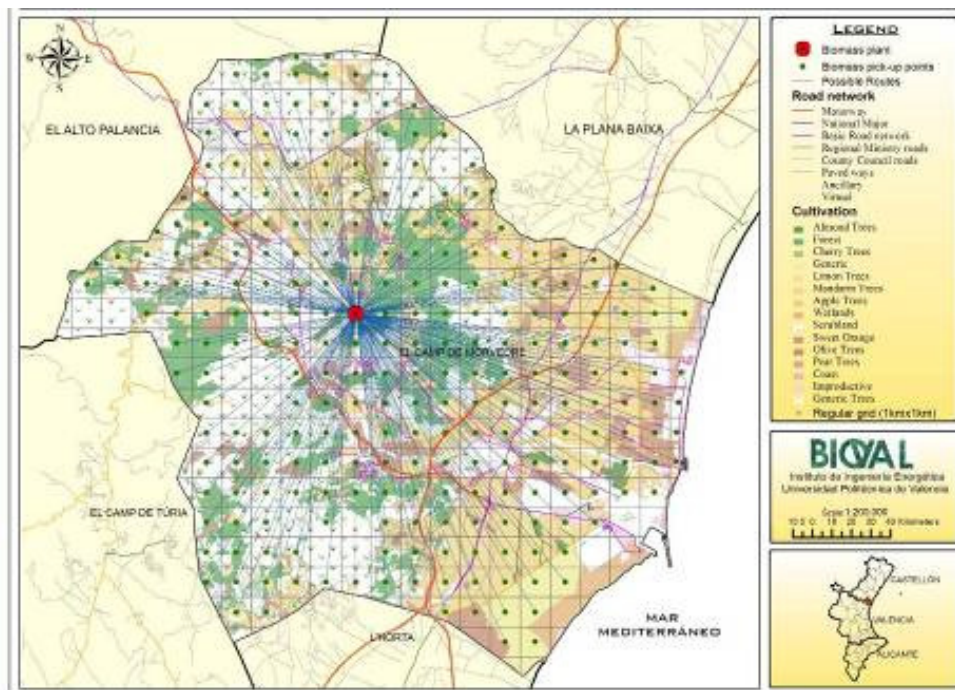


Figura 45. Ejemplo de la aplicación de la metodología en la comarca de Los Serranos

Los resultados estadísticos de la evaluación incluirá el nº de viajes realizados, distancia recorrida (km), biomasa recogida (t/año), tiempo empleado (h), demanda estimada comarcal (pellets) y coste de recogida y distribución (€/t de biomasa). Además, los resultados estadísticos de cada punto de evaluación irán acompañados de los resultados gráficos obtenidos a partir de los análisis cartográficos para cada una de las zonas de actuación y su mejor interpretación (ver el apartado Resultados del proyecto).

Por este motivo y para dicho análisis, es necesaria una herramienta en la que podamos implementar los algoritmos de cálculo según nuestras necesidades, del mismo modo que sea capaz de interpretar la estructura espacial de un sistema lineal interconectado (como es el caso de una red de comunicaciones).

Es necesario establecer una serie de criterios y propiedades antes de la introducción de parámetros y realizar el cálculo de las combinaciones (o rutas), es decir, definir el *escenario*. Concretamente, se debería determinar la unidad de transporte, la impedancia (tiempo, distancia, etc.), que puntos de aportación de biomasa van a ser considerados (dependiendo de la distancia a la que se encuentren de la vía de comunicación), cuáles van a ser descartados (por acumular una cantidad de biomasa insuficiente para su recogida o por estar a una distancia de las vías de comunicación mayor a la establecida), etc.

La mayoría de las herramientas de análisis de redes para el cálculo de rutas, áreas de servicio, etc. precisan de cierta información adicional en la base de datos así como determinar las ecuaciones matemáticas que se van a utilizar. De modo que, las siguientes ecuaciones y atributos fueron las que se establecieron en la información temática de los EJES de las vías de comunicación.

▪ **Atributos generales para el análisis de la red**

- *Tipo*: Nos informa por el tipo de vía por el que se circula el vehículo pesado
- *Velocidad estimada*: Hace referencia a la velocidad media estimada en cada tipo de vía en el caso de un vehículo pesado (camión).
- *Longitud*: Es el campo donde esta almacenada la distancia de cada uno de los tramos que forman la red global. Esta distancia se obtiene en la geodatabase.
- *Tiempo*: Hace referencia al tiempo empleado para recorrer cierta distancia almacenada en el campo *Longitud* a una determinada velocidad. La formulación aplicada es:

$$Tiempo \text{ (min)} = \frac{longitud \text{ (Km)}}{Velocidadestimada \text{ (Km/h)}} * 60 \quad \text{Ec. 56}$$

- *Oneway*: Este campo se refiere al sentido de circulación. En este caso se permite circular en ambos sentidos.

▪ **Número total de combinaciones** en una zona de actuación se calcula mediante la ecuación:

$$\text{Combinaciones totales} = N_{\text{Destinos}} * N_{\text{Origen}} \quad \text{Ec. 57}$$

Después de haber realizado el cálculo de todas las rutas (o combinaciones) podemos comenzar a realizar operaciones para obtener resultado estadísticos concretos, es decir, obtener los mejores resultados en base al tiempo empleado, teniendo en cuenta que todos los puntos de una misma comarca realizan el mismo número de viajes. La diferencia fundamental es que no emplean el mismo tiempo ni la misma distancia, la cual depende en gran medida de la biomasa que se va a recoger en cada punto, del tipo de vía, de la

ubicación del centroide de cada municipio para su distribución, etc. Toda la información alfanumérica obtenida después de realizar el cálculo de todas las combinaciones es necesaria para resolver las ecuaciones posteriores.

Estos atributos y cálculos son comunes tanto en la fase de recogida de la biomasa como en la de distribución. A continuación dividiremos la metodología en ambas fases para explicar cada una de ellas y como se ha procedido en el cálculo del coste final.

### ***AII.6.1. Metodología aplicada para la fase de recogida de biomasa. Cálculo del Coste de transporte.***

La gran diferencia entre ambas fases radica en cuales son los puntos de origen y los de destino que intervienen en el análisis de redes. En la fase de recogida de la biomasa disponible han sido considerados como:

- **Orígenes:** son los puntos de aportación de biomasa resultado de superponer la malla regular de 1 km<sup>2</sup> sobre el territorio y calculados sus centroides, para posteriormente dotar estos centroides de la biomasa disponible (según el tipo de cultivos y masas forestales que encierran).
- **Destinos:** son los puntos que representan las ubicaciones potenciales, es decir, aquellas ubicaciones que son susceptibles de instalar una planta de biomasa. Éstas se obtienen aplicando las restricciones medioambientales y de otros tipos para garantizar el cumplimiento de ciertas normas referentes a instalaciones energéticas de este tipo.

Las ecuaciones que se muestran a continuación han sido las empleadas para la obtención de determinados valores de interés y sobre todo para el cálculo del coste de transporte de recogida (ecuación 15).

- **Número de viajes de cada punto de evaluación (destino<sub>i</sub>).**  $NV_i$  es el número de viajes necesarios para transportar la biomasa desde un punto de aportación (origen<sub>i</sub>) a cualquier ubicación de una planta de biomasa (destino<sub>i</sub>). Esto queda definido por la ecuación:

$$NV_i = \frac{\text{Biomasa disponible}_i (t)}{\text{Unidad de transporte} (t)} \quad \text{Ec. 58}$$

- **Número total de viajes en cada zona de actuación ( $NV_{\text{Zona actuación}}$ ).** Este es uno de los datos más importantes del cálculo puesto que nos da el número de viajes necesarios para transportar toda la biomasa de la zona de actuación a cualquier punto de evaluación (destino<sub>i</sub>)

$$NV_{\text{Zona actuación}} = \sum_{i=1}^n (NV_i * 2) \quad \text{Ec. 59}$$

▪ **Velocidad Media de cada punto de evaluación (destino<sub>i</sub>).**  $\bar{V}_i$  representa la velocidad media para cada destino<sub>i</sub> (punto de evaluación) con respecto a todos los puntos de aportación de su zona de actuación, donde  $d_i$  (metros) es la distancia utilizando la red de transporte entre el punto de evaluación a cada punto de aportación de biomasa (combinación o ruta) y  $t_i$  (minutos) es el tiempo empleado en recorrer cada distancia  $d_i$  a cierta velocidad (velocidad estimada). La siguiente expresión define  $\bar{V}_i$  como:

$$\bar{V}_i \text{ (km / h)} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n t_i} * \frac{60}{1000} \quad \text{Ec. 60}$$

▪ **Velocidad Media en cada zona de actuación ( $\bar{V}_{Zona \text{ actuación}}$ )**

$$\bar{V}_{Zona \text{ actuación}} \text{ (km / h)} = \sum_{i=1}^n \frac{\bar{V}_i}{n} \quad \text{Ec. 61}$$

▪ **Biomasa Total en cada zona de actuación.** Esta es una información obtenida mediante la ecuación 62 pero puede ser calculada y comprobada a partir de los nuevos datos, tal y como muestra la siguiente expresión. El término Z.A. significa zona de actuación pudiendo ser establecida en un municipio, comarca, provincia, radio, etc.

$$\text{Biomasa Disponible}_{Z.A.} (t) = NV_{Z.A.} * \text{Unidad de transporte} (t) \quad \text{Ec. 62}$$

▪ **Función de coste de recogida de cada punto de evaluación (destino<sub>i</sub>).** En el proyecto se han analizado las alternativas de transporte con previa compactación (FCC), y se ha definido la función de costes para cada una de ellas. La función de costes  $FC_i$  (€/t) estima los costes de transporte totales para llevar al destino<sub>i</sub> toda la biomasa de los puntos j de origen, y queda definida por las siguientes expresiones:

$$FC_i \text{ (€)} = (CF_1 + CF_2) \cdot NV_i + CV \cdot \sum_{i=1}^n d_i \quad \text{Ec. 63}$$

$$FC_i \text{ (€)} = 126 \cdot NV_i + 2.05 \cdot \sum_{i=1}^n d_i$$

En la constante de costes fijos, CF (€/trayecto), el término CF1 está asociado a las operaciones de carga y descarga en las que se consume tiempo, recursos humanos y



combustible. El término CF2 está asociado a los costes de compactación previa al transporte en caso de utilizarse, en caso contrario CF2 = 0. La constante CF se ha calculado para una carga completa de la unidad de transporte (un viaje), el coste total se calcula multiplicando por el número total de viajes realizados (NVi).

La constante de costes variables, CV (Km), es un término asociado a la distancia, di el cual tiene en cuenta los costes debidos al combustible consumido, recursos humanos y mantenimiento del vehículo. La constante CV se ha calculado por kilómetro, y el coste total se obtiene al multiplicar por la distancia total recorrida, Σdi, en el transporte de toda la biomasa hasta el punto destino; que esta siendo evaluado.

- **Coste de recogida de cada punto de evaluación (destino;)** se obtiene mediante la fórmula:

$$\text{Coste Recogida (€ / t)} = \frac{FC_i}{\text{Biomasa Disponible}_{Z.A.}} \quad \text{Ec. 64}$$

### ***AII.6.2. Metodología aplicada para la fase de distribución de biomasa. Cálculo del Coste de transporte.***

En la fase de distribución de la biomasa disponible han sido considerados como:

- **Orígenes:** son los puntos que representan las ubicaciones potenciales de la fase de recogida, es decir, una vez toda la biomasa se ha recogido y se ha llevado a esas posibles ubicaciones (susceptibles de instalar una planta de biomasa), por lo tanto todas esas localizaciones disponen de la misma cantidad biomasa. Esta biomasa será diferente en cada comarca, y corresponde con la generada en cada una de ellas. Como explicaremos a continuación, la biomasa disponible se ha transformado en las plantas en pelets por su mayor manejabilidad a la hora de distribuirla.
- **Destinos:** son los puntos que se obtienen al calcular el centroide de cada municipio para cada comarca. Por lo tanto existirán tantos puntos de distribución como municipios haya en cada una de las comarcas. Se ha elegido como puntos de distribución los centroides de los municipios puesto que no se conoce de manera precisa el destino final de la biomasa, pudiendo ser los consumidores potenciales aquellos que se han detallado en el apartado de segmentación de la demanda energética.

Siguiendo con la metodología, en esta fase de distribución se pretende calcular y evaluar todas las combinaciones posibles entre los puntos orígenes y puntos destinos ya establecidos. Se entiende por combinación en esta fase a la ruta o trayectoria existente entre un punto origen (ubicaciones potenciales con toda la biomasa recogida de la fase anterior, pelets) y un punto destino (centroide de cada municipio donde se transporta la biomasa para su distribución). Una vez evaluadas todas las ubicaciones potenciales para

instalar una planta de biomasa y conocido el **Coste Total (€/t)**, se eligen en este caso por un criterio económico, las de menor coste para cada comarca. La Figura 46 muestra una representación gráfica tomando como ejemplo todas las ubicaciones potenciales para instalar una planta de biomasa de la fase de recogida (orígenes) y el centroide de un municipio en la comarca de L'Horta de Valencia (destino), utilizando las vías de comunicación pertenecientes a esa comarca.

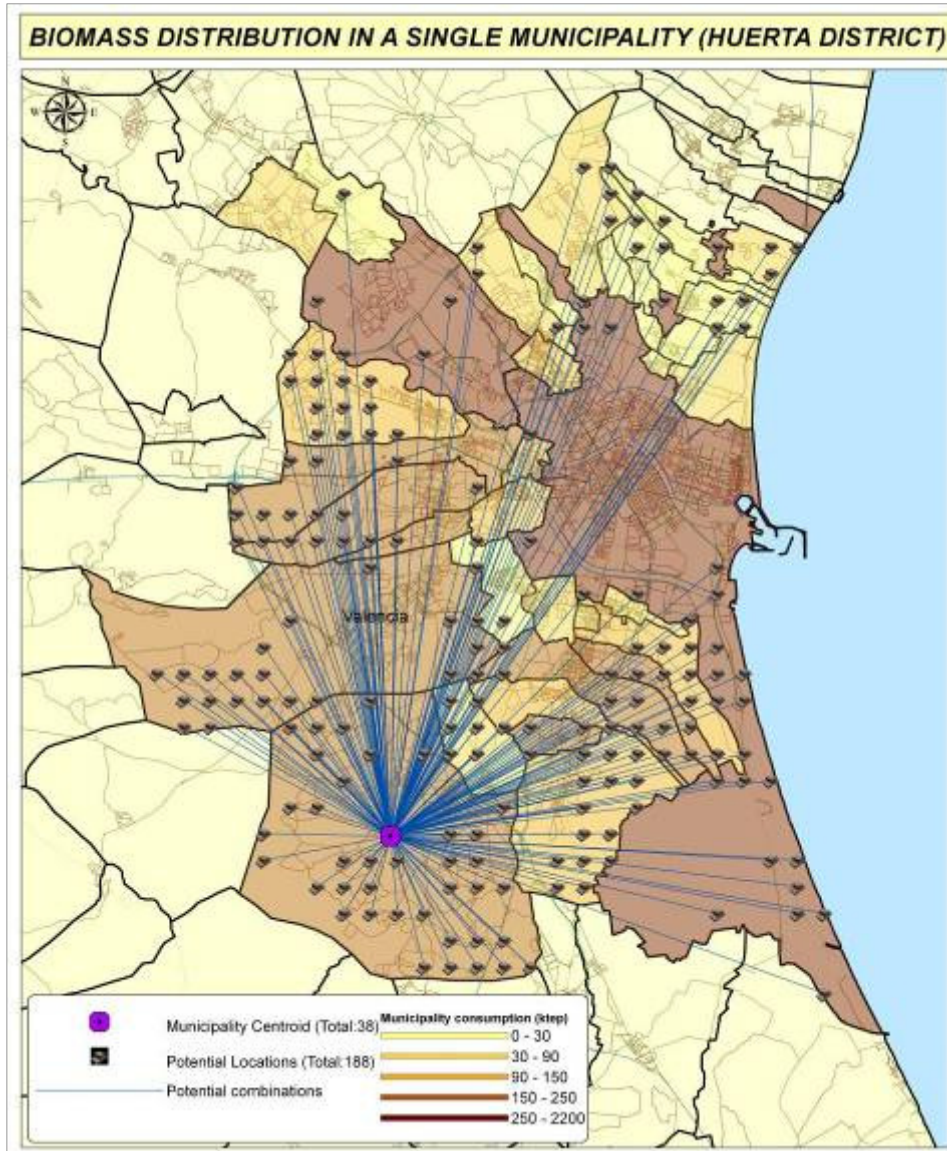


Figura 46. Ejemplo de la aplicación de la metodología en la comarca de L'Horta de Valencia (fase de distribución)

Para conocer la estimación de la demanda potencial de biomasa (MWh/año) en cada municipio y para cada comarca se ha recurrido a las gráficas 12 y 13 del apartado siguiente Segmentación de la demanda. Aplicando la ecuación de la curva para los sectores R (residencial), S (servicios) y H (hostelería), y posteriormente sumándole la ecuación correspondiente al sector industrial es posible conocer dicha demanda, en función del número de habitantes a nivel municipal (fuente: Instituto Nacional de Estadística, 2007). Por lo tanto, la demanda energética municipal se calcula a partir de la ecuación:

$$\text{Estimación de la Demanda municipal (MWh / año)} = 0,1699x^{0,95} + 0,1289x^{1,0680} \quad \text{Ec. 65}$$

Una vez es conocida la estimación de la demanda en MWh/año para cada municipio y asumiendo que la unidad de transporte del camión es de 10 toneladas de pelets, podemos conocer que cantidad de energía estamos transportando. La cantidad de energía distribuida es de 180 GJ/trayecto (1kg de pelets es equivalente a 5kwh). Por lo tanto, conociendo estos valores y el número de viajes que ha de realizar el camión desde cada origen a cada destino es posible establecer el consumo energético potencial en cada municipio. Como ocurría en la fase de recogida de la biomasa, el número de viajes (NV<sub>i</sub>) se comporta como un peso para cada ruta o combinación, aplicando en la fase de distribución la siguiente ecuación:

$$NV_i = \frac{\text{Pelets municipio}_i (t)}{\text{Unidad de transporte} (t)} \quad \text{Ec. 66}$$

El cálculo del **Coste de Distribución (CD)** se obtiene mediante la ecuación 19. Esta ecuación está basada en el artículo titulado “Pellets for Europe” (Altener 2002-012-137-160) donde se utiliza como indicador de costes de transporte para la distribución el intervalo 0.05 a 0.2 €/t·km, e incluso pudiendo alcanzar para consumidores domésticos los 0.3 €/kg.

$$CD (\text{€})_{\text{Municipal}} = 0.2 \text{ € / t} * \sum_{i=1}^n \text{Dis tan cia}_i \quad \text{Ec. 67}$$

siendo  $t$  la suma total de pelets en un municipio concreto, y  $\sum \text{dis tan cia}_i$  el sumatorio de la distancia ponderada para cada punto de evaluación, es decir, para cada posible ubicación de la planta de biomasa.

Por último, únicamente queda por determinar el **Coste Total (€/t)** para cada punto de evaluación. El Coste Total se obtiene de la suma de los dos costes anteriores, recogida y distribución para un mismo punto de evaluación  $i$  (para la misma ubicación potencial). De modo que la ecuación 20 quedaría:

$$\text{Coste Total (€ / t)}_i = \text{Coste Re cogida (€ / t)}_i + \text{Coste Distribución (€ / t)}_i \quad \text{Ec. 68}$$

Como se ha mencionado anteriormente, resolviendo los modelos espaciales que calculan estos valores de manera automática para todas los puntos de evaluación  $i$ , es decir, para todas las ubicaciones potenciales susceptibles de instalar una planta de biomasa, se eligen aquellas cuyo Coste Total es mínimo. En nuestro estudio, se han seleccionado las 5 mejores ubicaciones de cada comarca de las tres provincias estudiadas. Los valores obtenidos en la fase de recogida y transporte para las mismas se recogen en una tabla resumen que se muestra junto con otros datos de interés en forma de informe global en el apartado 6. Resultados del proyecto.

## ***AII.7. RESULTADOS DEL PROYECTO***

### ***AII.7.1. Resultados de la valoración de la biomasa y obtención de las mejores ubicaciones para la instalación de plantas de biomasa***

Los siguientes resultados han sido obtenidos a partir de la aplicación de la metodología descrita anteriormente y resumidos aquellos considerados como más relevantes. A continuación se explica brevemente cada uno de los apartados de información que se encuentra en cada ficha o informe comarcal para las tres provincias estudiadas. Ello nos proporciona un entendimiento global de cada comarca respecto a su potencial biomásico, demanda energética, localizaciones potenciales para plantas de biomasa y costes de transporte fundamentalmente.

El primer cuadrante (arriba izquierda) muestra un mapa de ubicación de la comarca en el ámbito de la comunidad autónoma en el que se ubica. Además, algunos datos relevantes de la comarca tales como población, superficies, etc., junto con la representación de la biomasa forestal y agrícola por especies calculada previamente.

El segundo cuadrante (centro izquierda) representa la biomasa agrícola y forestal mediante una gráfica de columnas para establecer una comparativa en toneladas potenciales. Las columnas coloreadas en naranja corresponden a la biomasa agrícola y las verdes a la biomasa forestal.

El tercer cuadrante (abajo izquierda) representa la demanda energética potencial de biomasa a nivel municipal para cada una de las comarcas. Para el cálculo de estos valores el principal indicador ha sido el número de habitantes por municipio. Los colores más fuertes (marrones oscuros) representan los municipios con un mayor consumo (ktep) que coinciden normalmente con los núcleos de población con mayor densidad de población. Los colores más suaves (amarillos claros) corresponden con los municipios de menor demanda energética.

El cuarto cuadrante (arriba derecha) representa gráficamente los resultados obtenidos de la fase de recogida de la biomasa y de su distribución. Esta figura nos muestra las 10 mejores ubicaciones (5 mejores ubicaciones para la recogida, en color rojo, y 5 mejores ubicaciones para la distribución, en color azul). Los puntos representados en color verde representan los lugares de aportación de biomasa, tanto agrícola como forestal, es decir, los lugares hasta donde el camión se ha desplazado y ha recogido la biomasa (previa compactación).

El quinto cuadrante (centro derecha) es una tabla resumen de los principales resultados estadísticos. Éstos han sido calculados para todas las ubicaciones potenciales (en la fase de recogida y distribución) a partir de modelos espaciales mediante el Sistema de Información geográfica (ArcGis 9.3), y posteriormente dichos modelos han sido resueltos con la aplicación Desktop- Grid creada para tal fin y la plataforma BOINC. En dicho resumen se observan los datos para las 5 mejores ubicaciones representadas (costes de transporte mínimos) y finalmente unos datos globales los cuales tienen en cuenta todos los puntos de aportación de biomasa así como todas las ubicaciones potenciales de la comarca. Uno de los datos más relevantes de esta tabla es el coste total, obtenido a partir de la suma del coste de recogida y el coste de distribución de cada una de las ubicaciones potenciales para la instalación de una planta de biomasa.

El sexto cuadrante (abajo derecha) es la representación de las 5 mejores ubicaciones para la instalación de una planta de biomasa, teniendo en cuenta que la suma del coste de transporte en la fase de recogida y de distribución es el mínimo para estas cinco localizaciones. Los puntos en color gris distribuidos por la comarca son aquellas ubicaciones potenciales que han formado parte del cálculo, es decir, que han sido evaluadas puesto que cumplían las restricciones establecidas para este estudio

En los dos últimos recuadros se detalla la información geográfica (ubicación) de la comarca, en el de la izquierda, mientras que en el recuadro de la derecha se muestran los logos de las partes implicadas en este estudio.

Como última nota aclaratoria, es importante mencionar que las comarcas utilizadas para la realización de este estudio, para una mayor homogeneización de los datos, han sido las facilitadas por el Instituto Geográfico Nacional para las tres provincias. Éstas difieren, tanto en forma como en tamaño, de las comarcas que hubieran podido ser proporcionadas, como otra fuente oficial, por la comunidad autónoma correspondiente (Comunidad Valenciana, Galicia y Castilla- La Mancha).



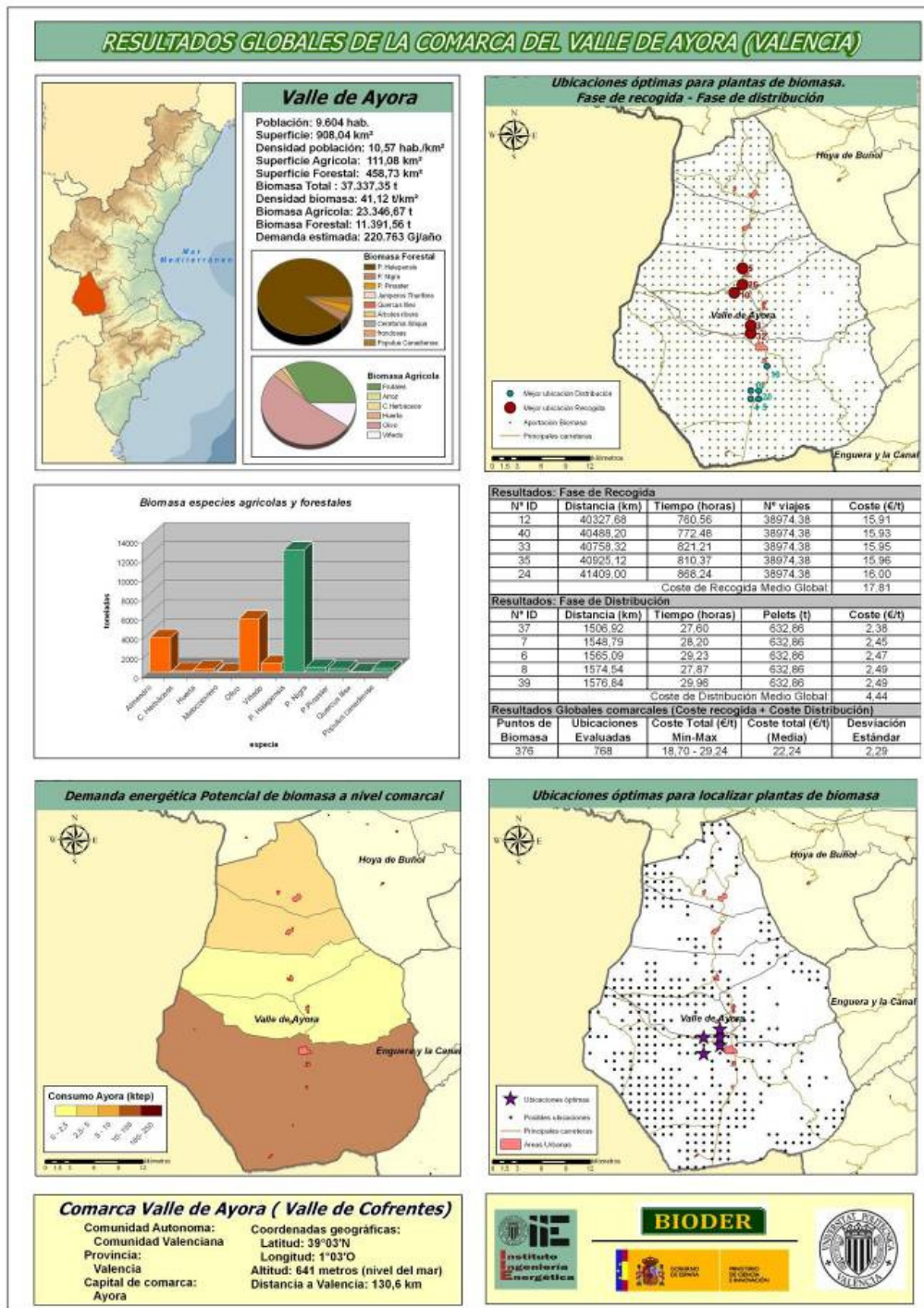


Figura 48. Resultado globales de la Comarca de Valle de Ayora

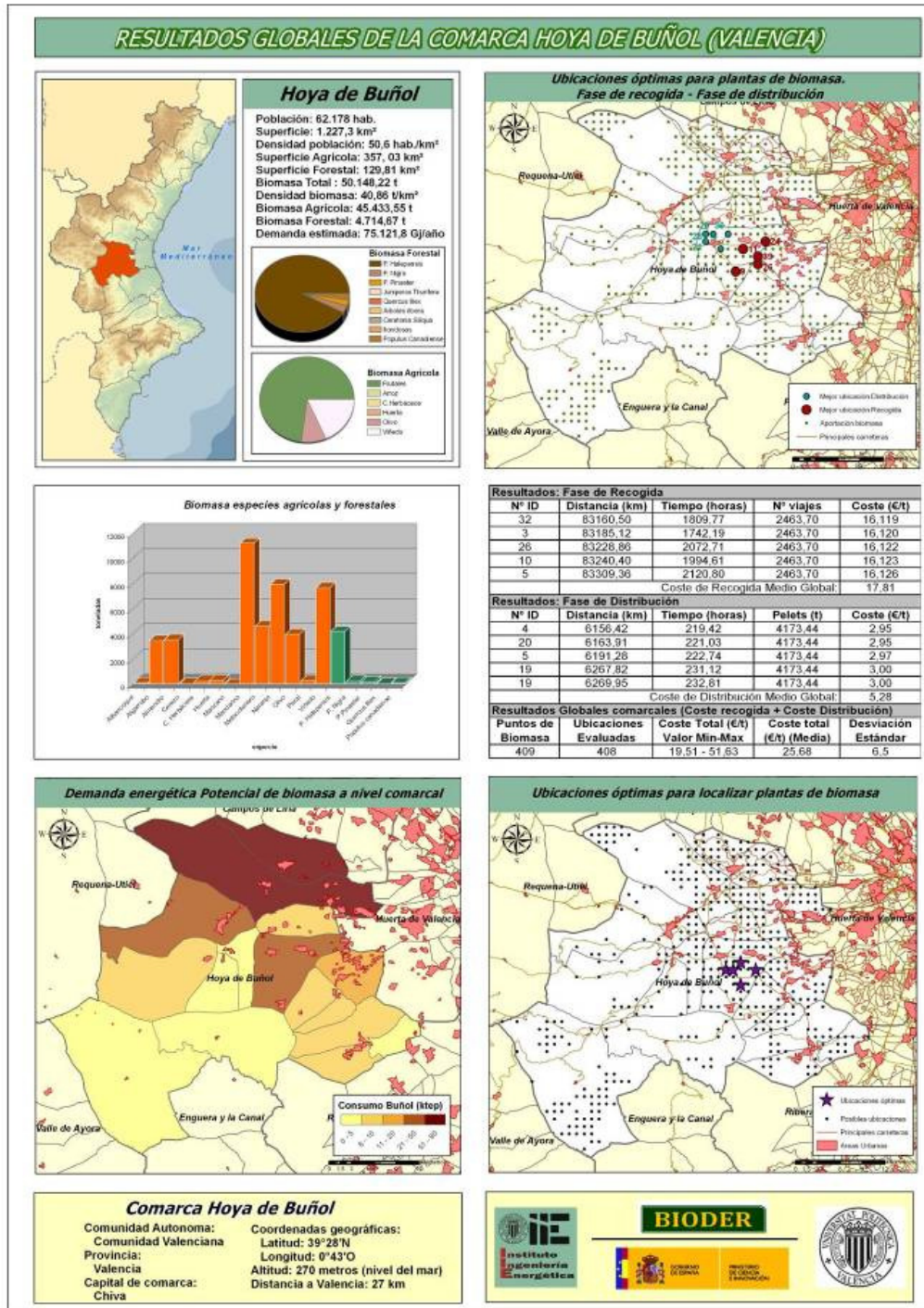


Figura 49. Resultado globales de la Comarca de La Hoya de Buñol



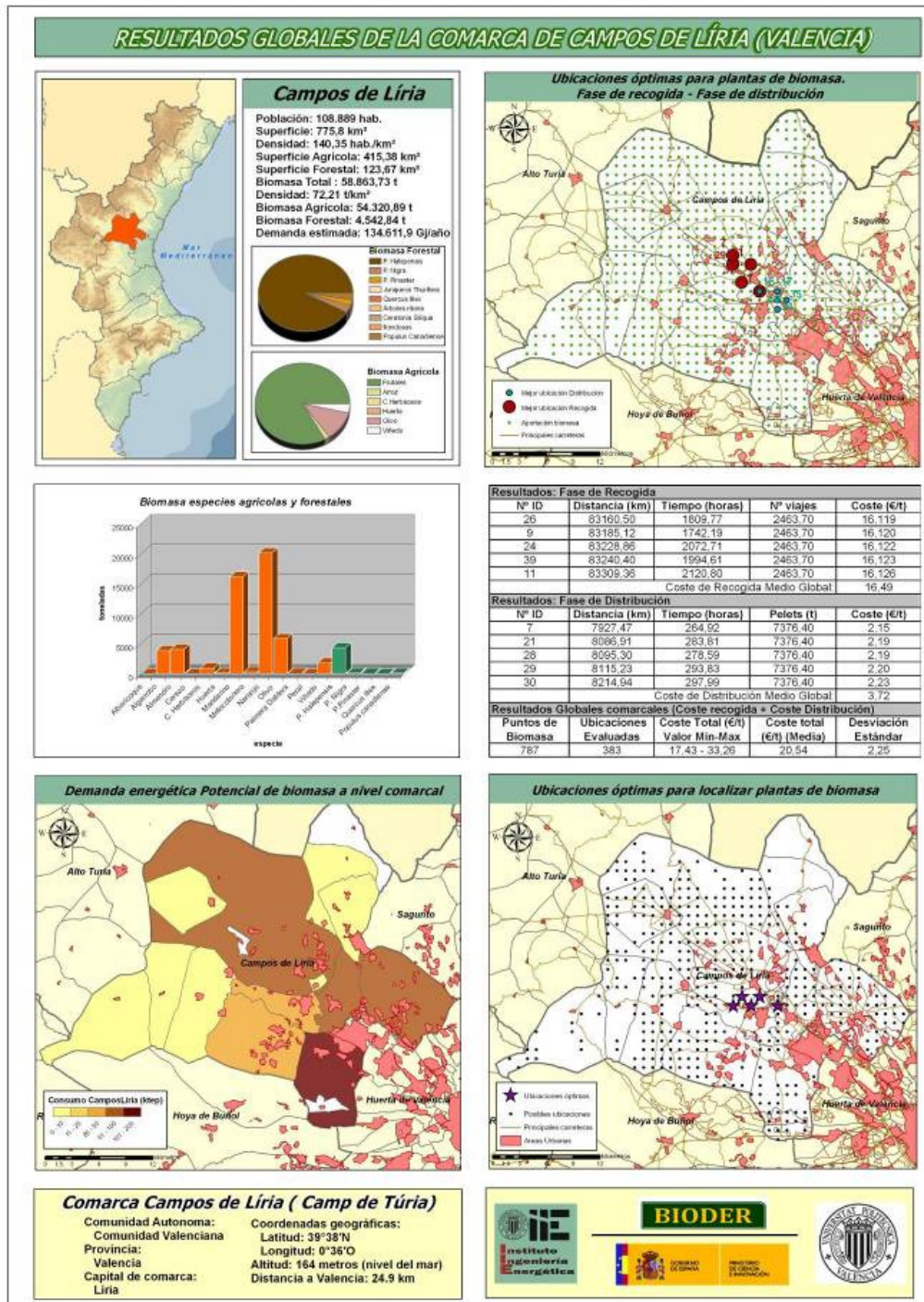


Figura 50. Resultado globales de la Comarca de Campos de Liria

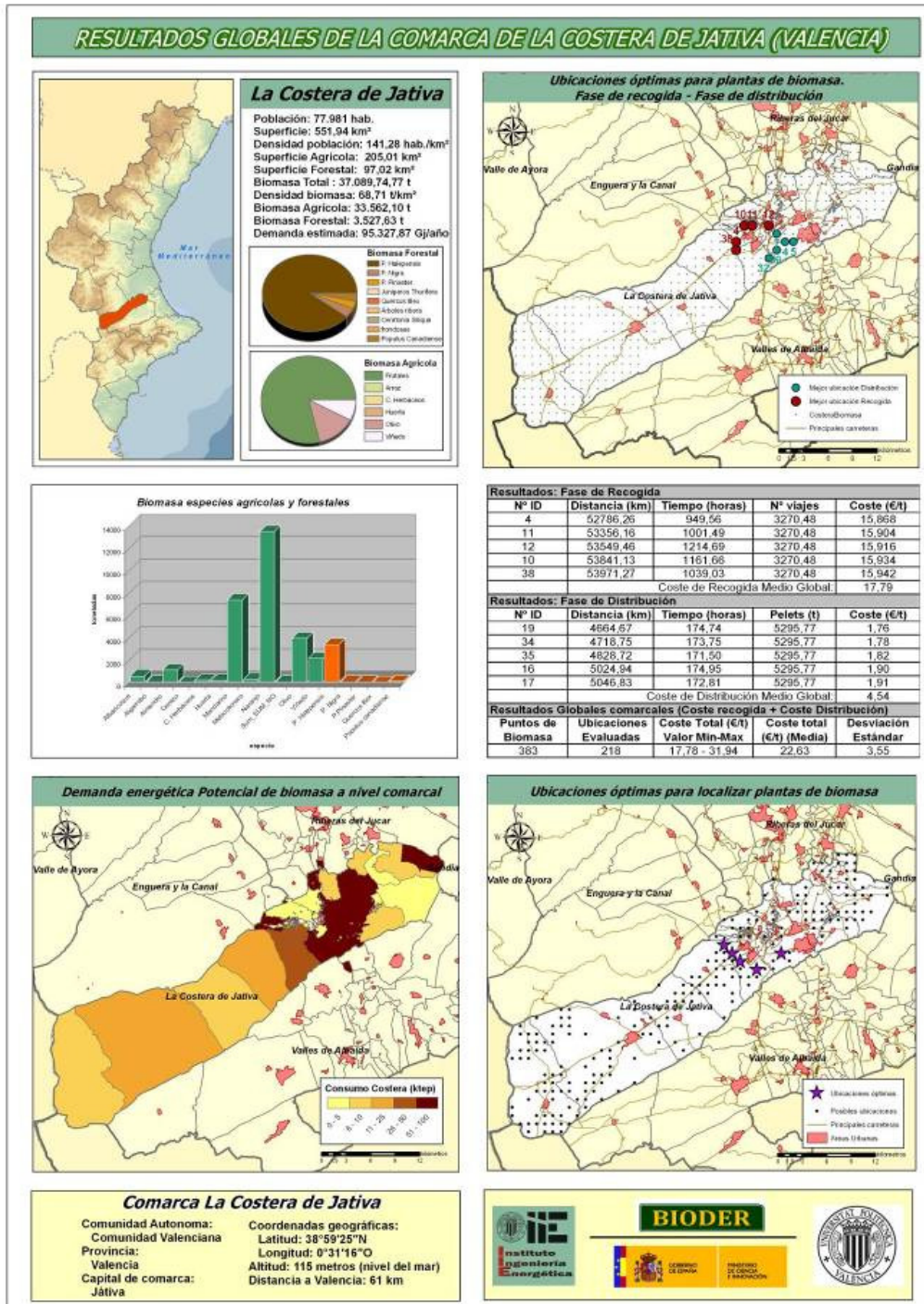
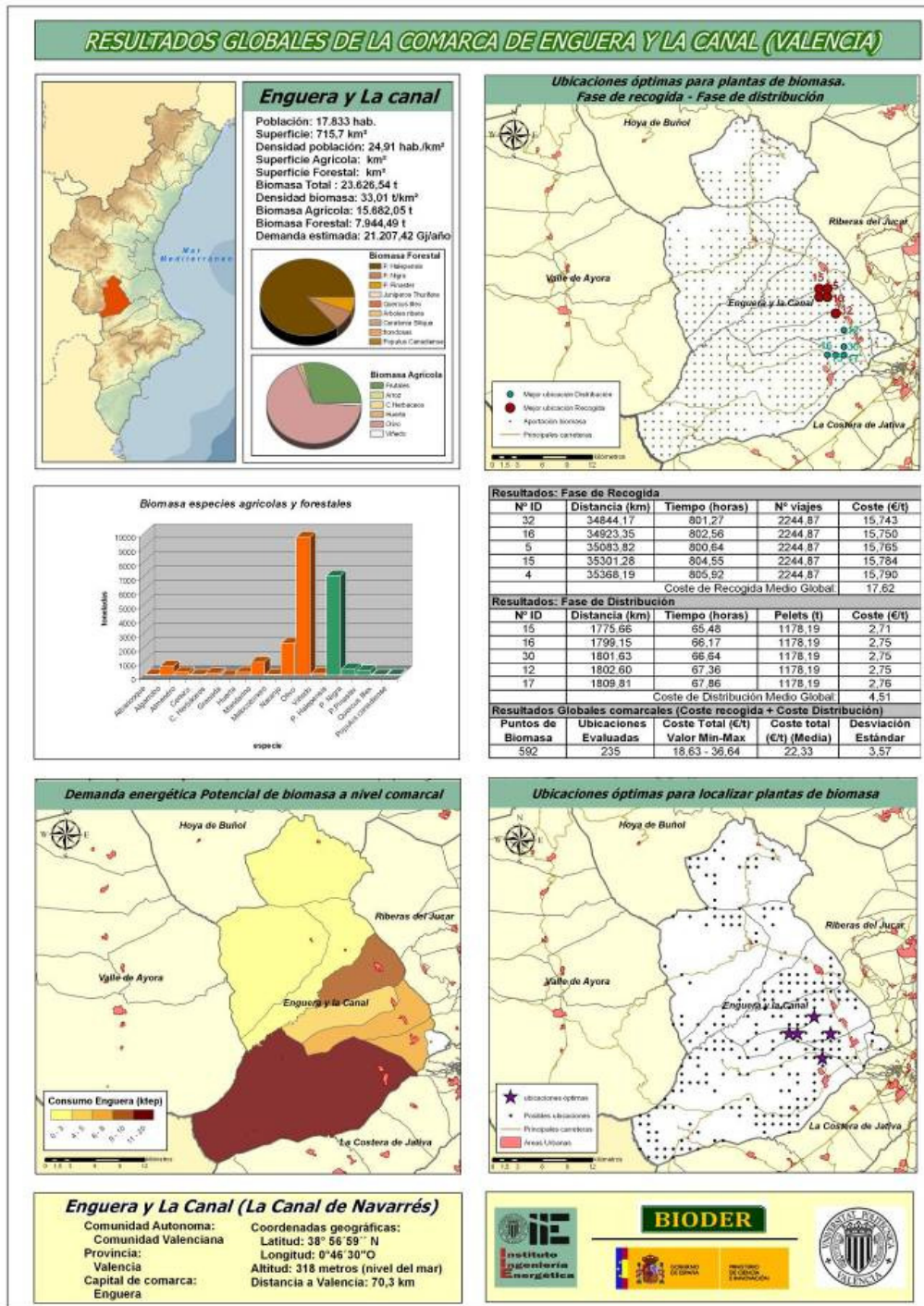


Figura 51. Resultado globales de la Comarca de La Costera de Játiva



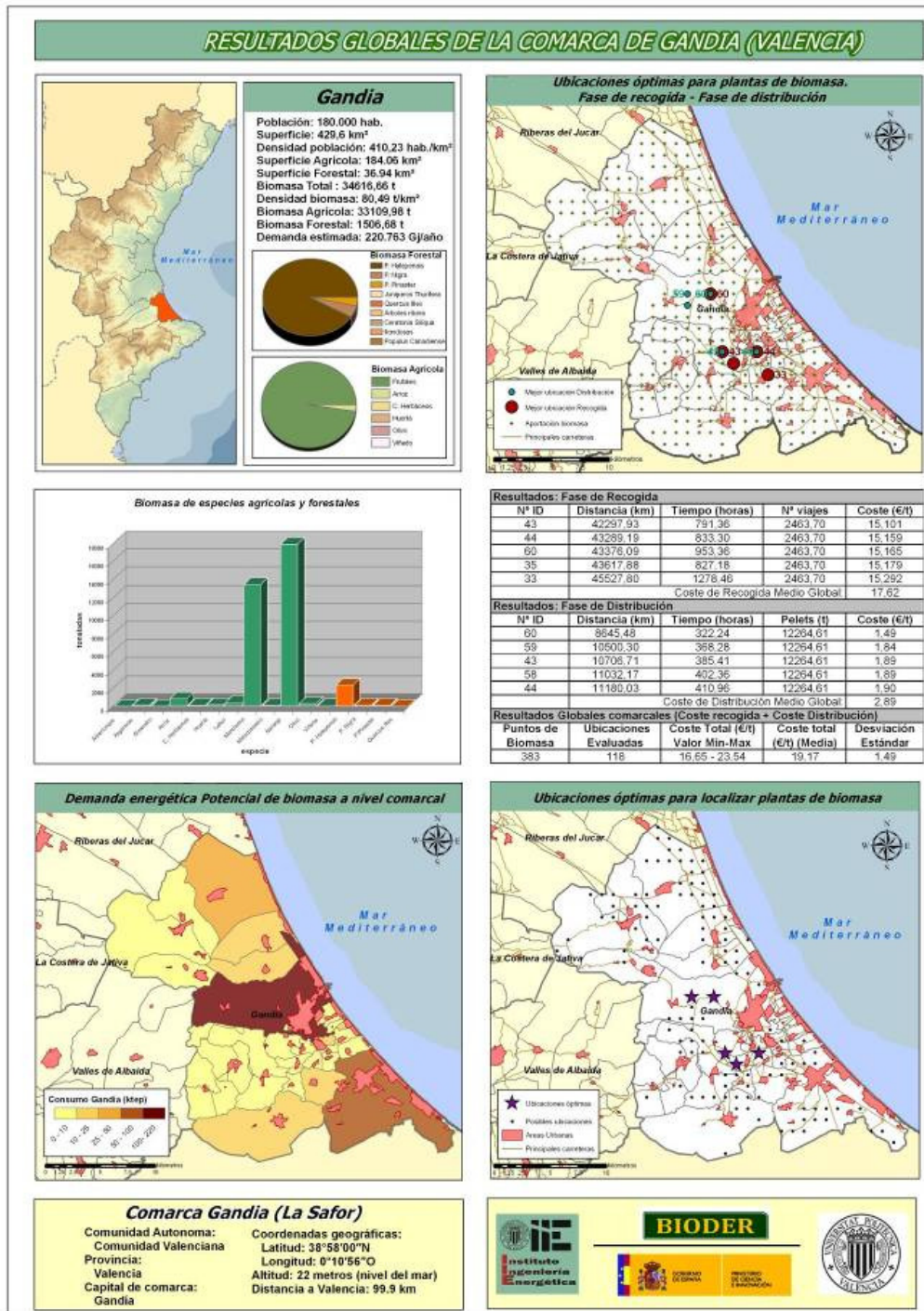


Figura 53. Resultado globales de la Comarca de Gandía

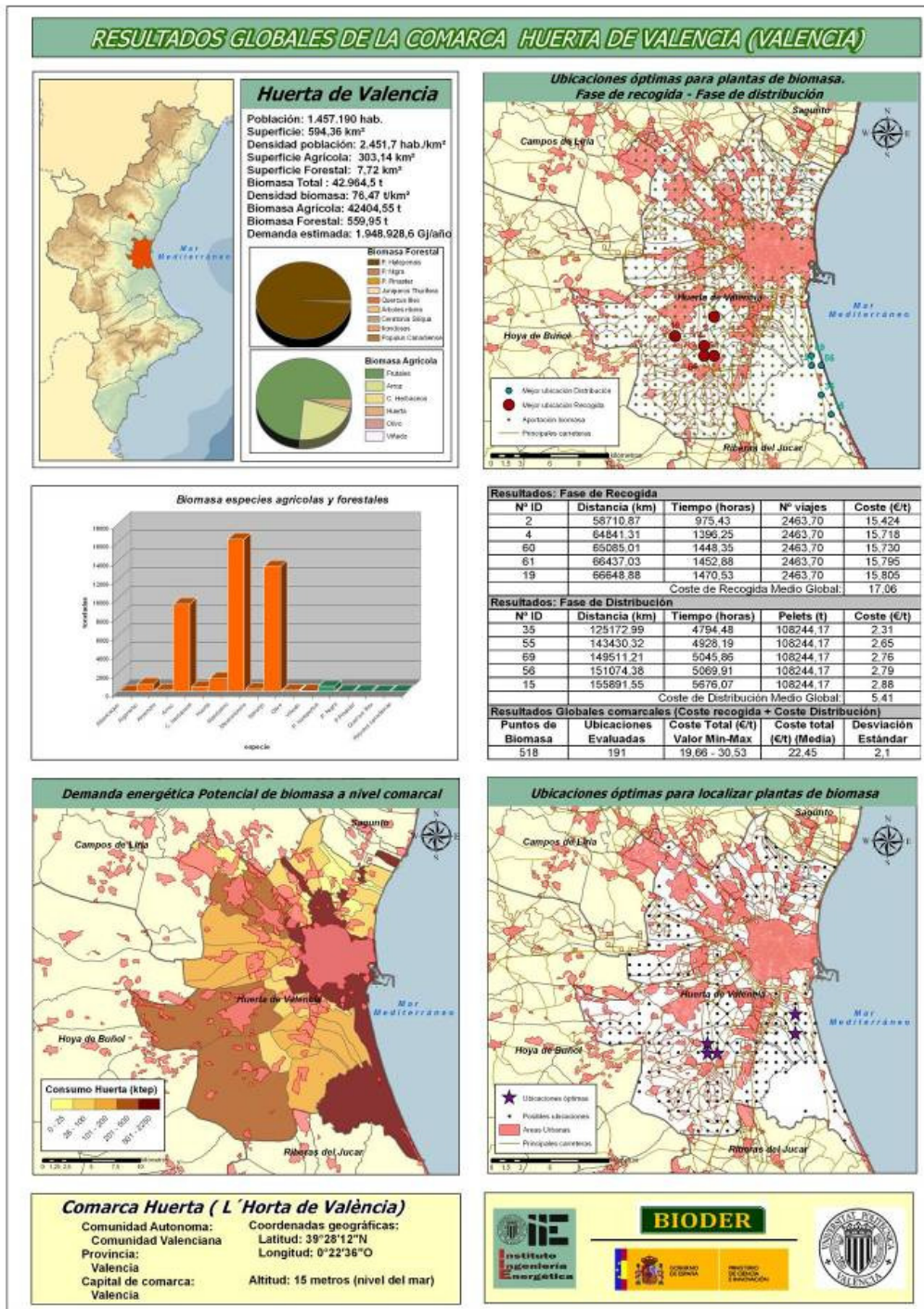


Figura 54. Resultado globales de la Comarca de L' Horta de València

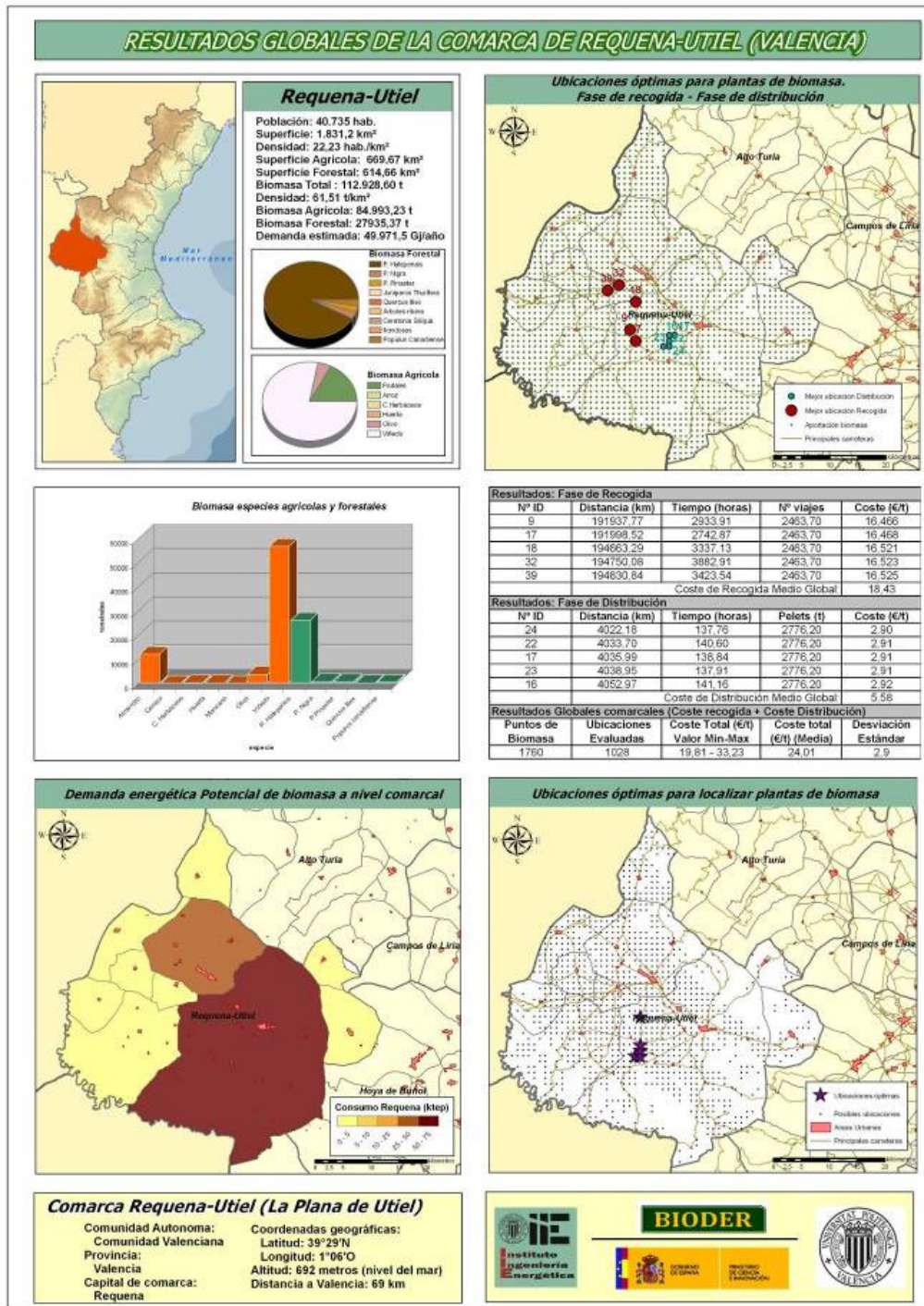


Figura 55. Resultado globales de la Comarca de Requena-Utiel

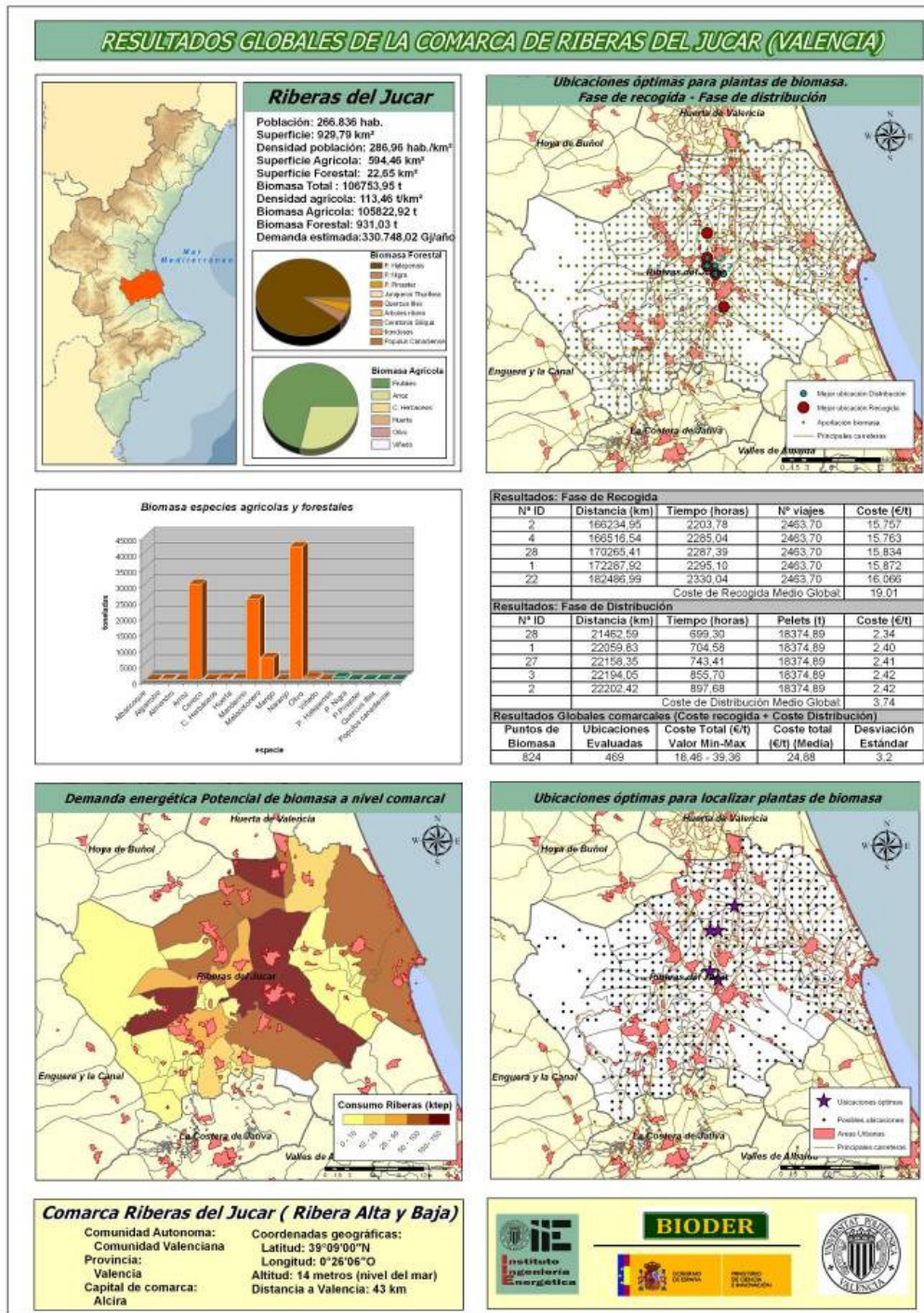


Figura 56. Resultado globales de la Comarca de Las Riberas de Júcar

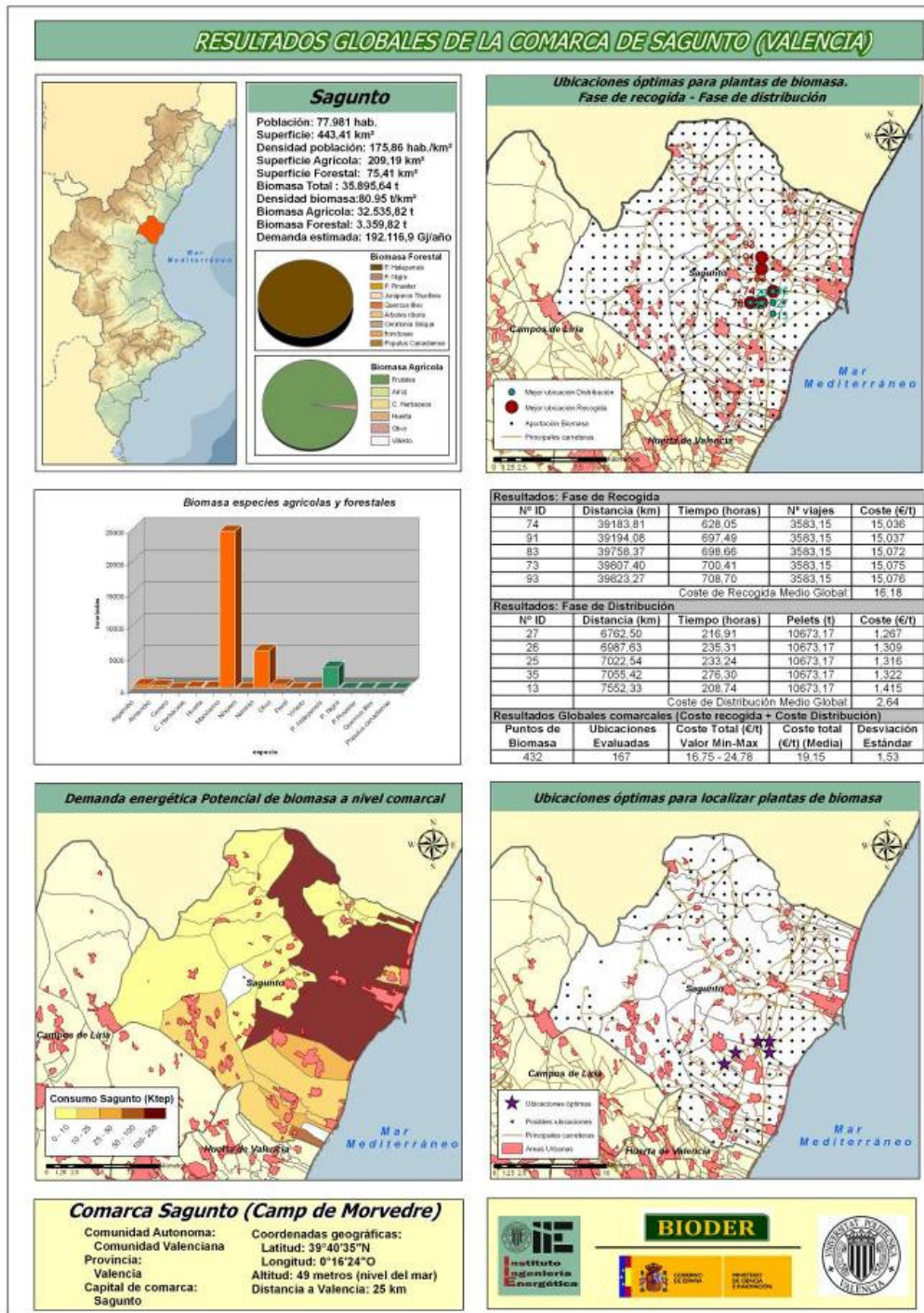


Figura 57. Resultado globales de la Comarca de Sagunto



Resultados globales comarcales de la provincia de Lugo (Galicia)

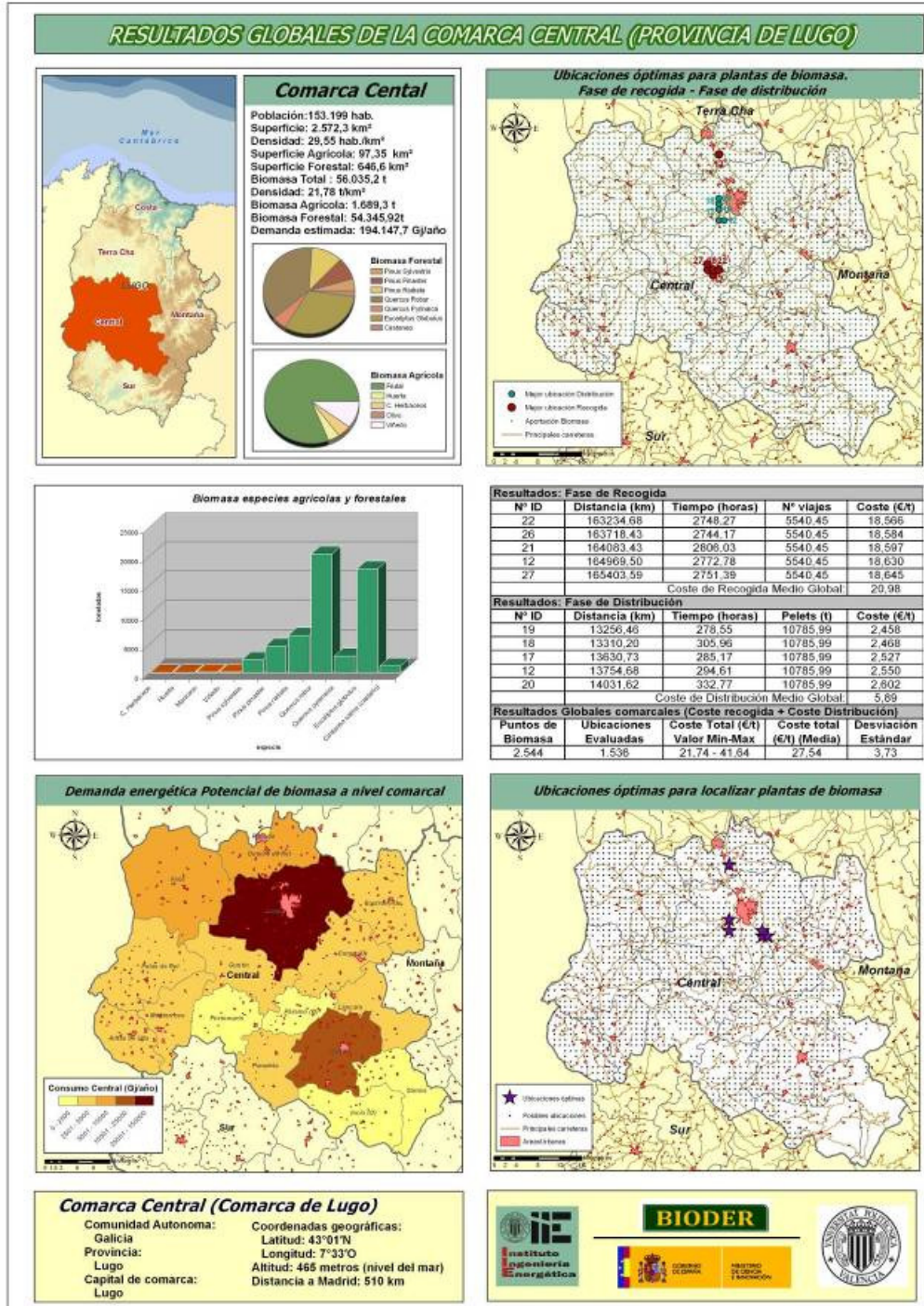


Figura 58. Resultado globales de la Comarca Central

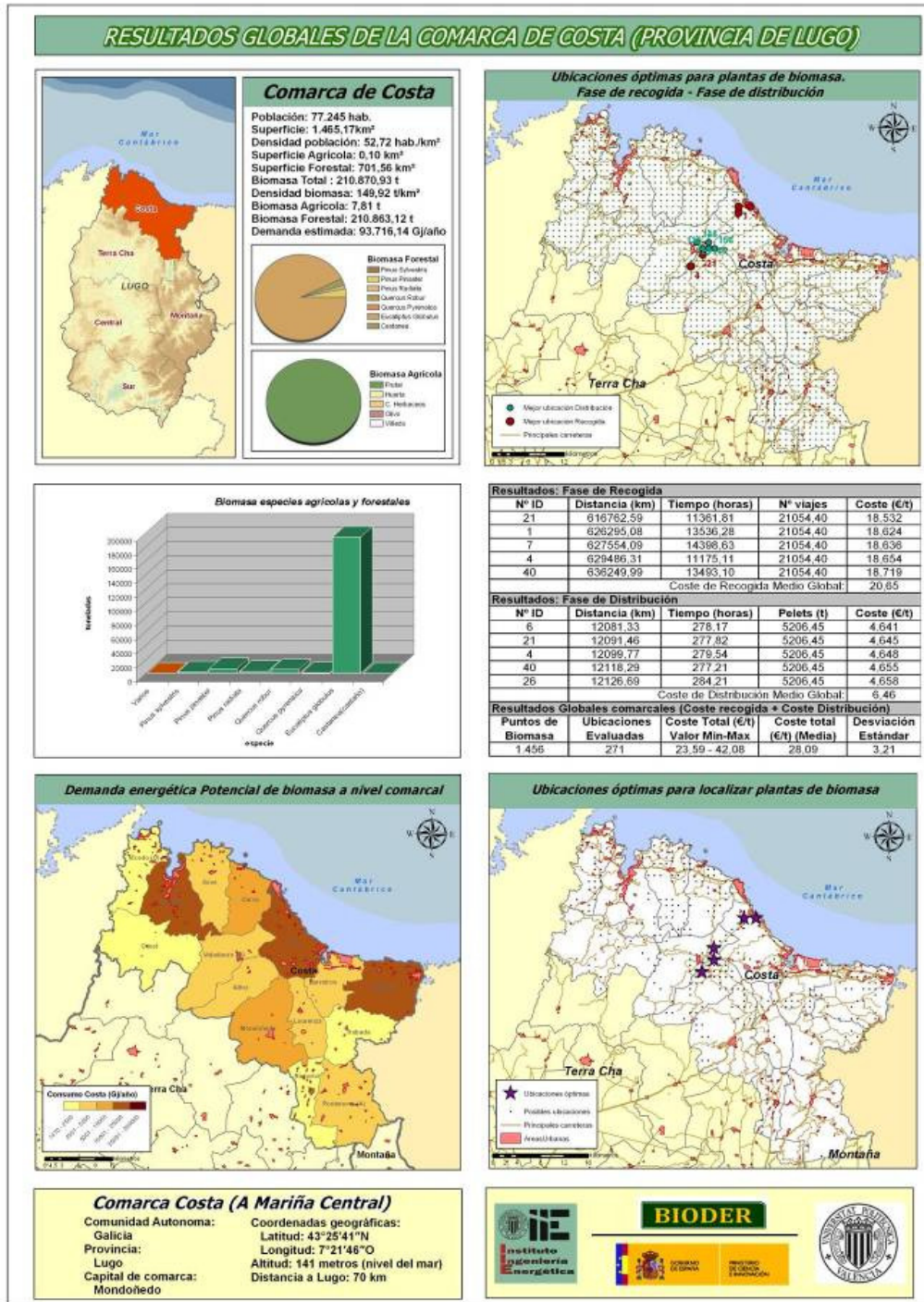


Figura 59. Resultado globales de la Comarca Costa

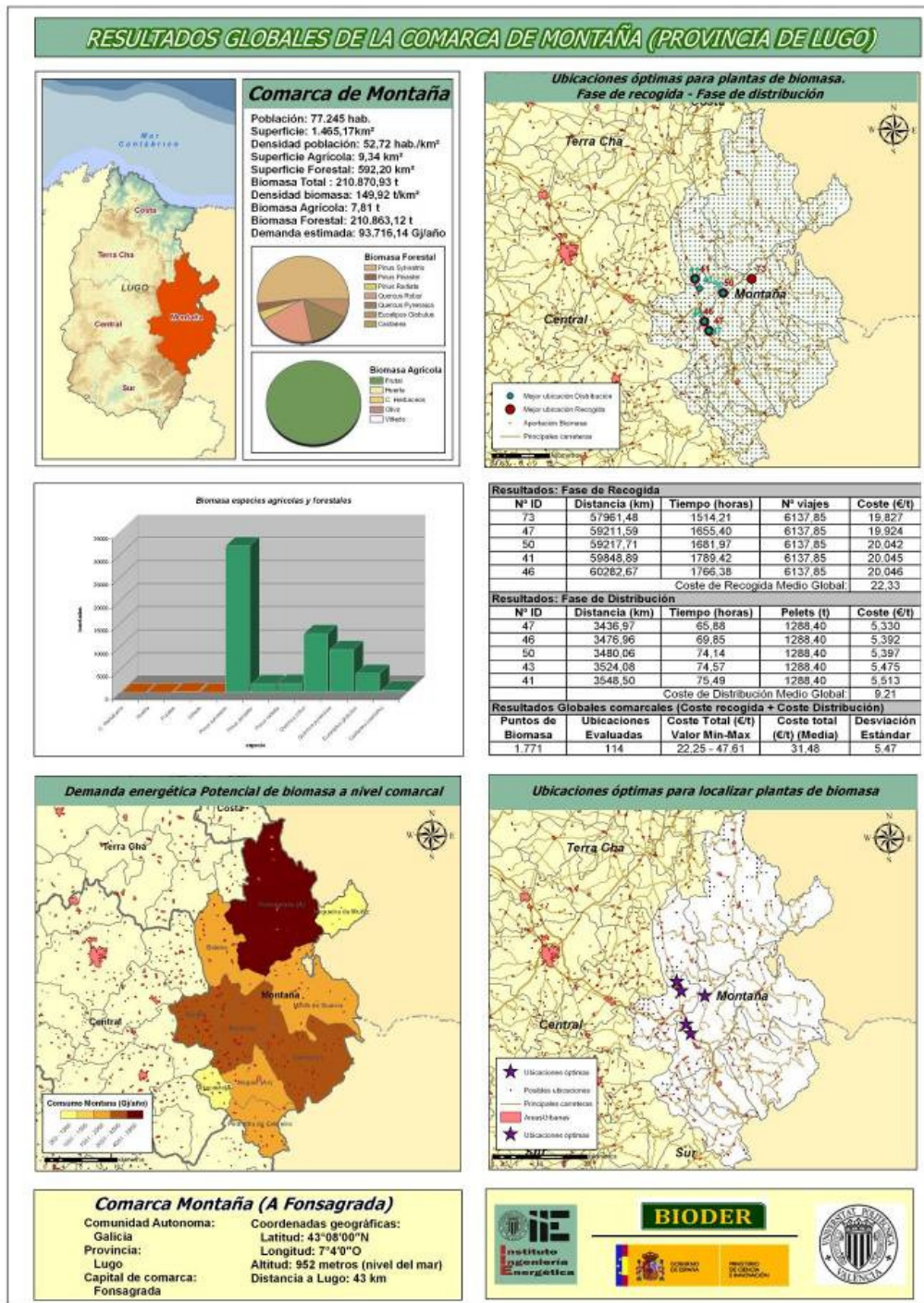


Figura 60. Resultado globales de la Comarca Montaña

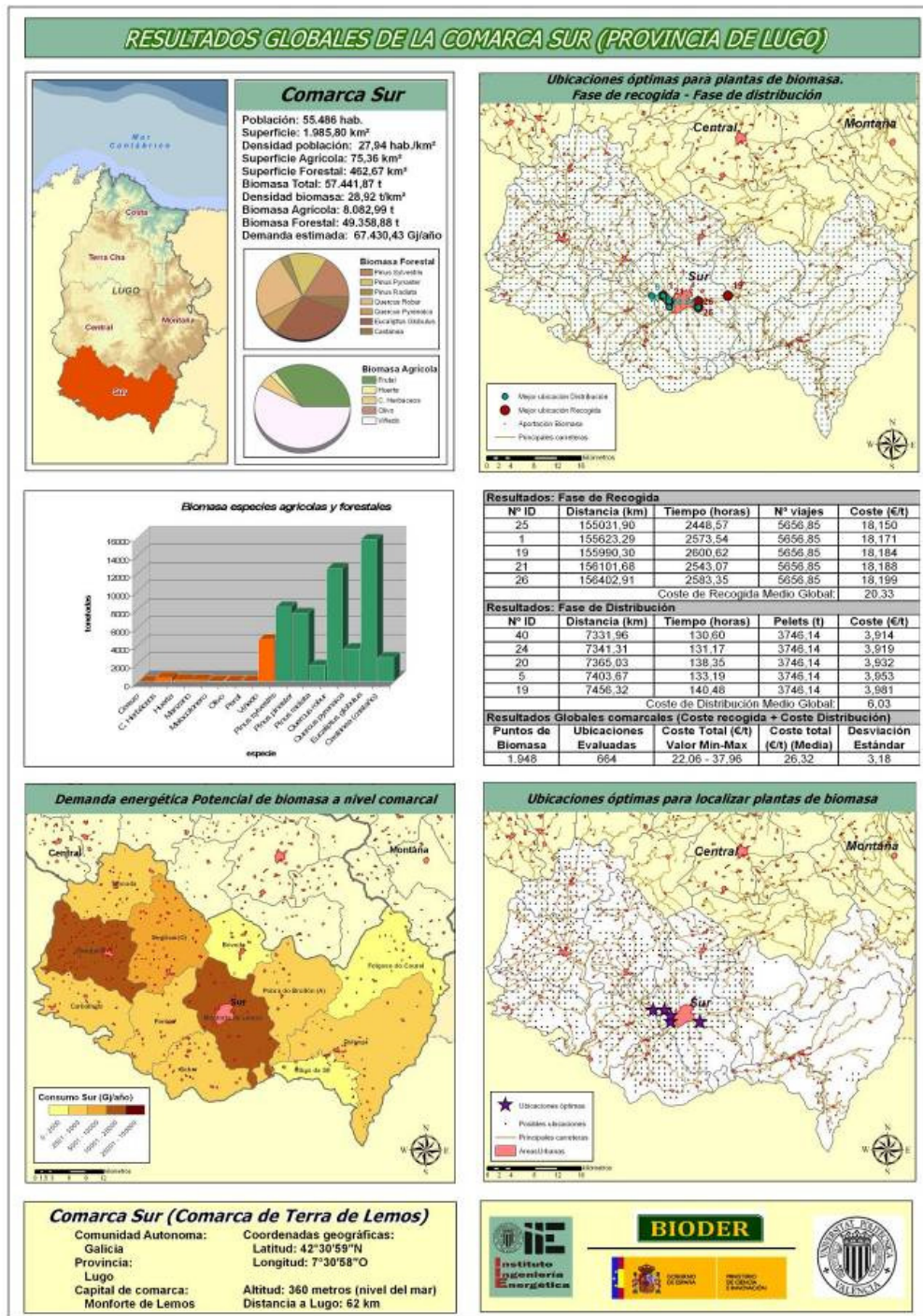


Figura 61. Resultado globales de la Comarca Sur

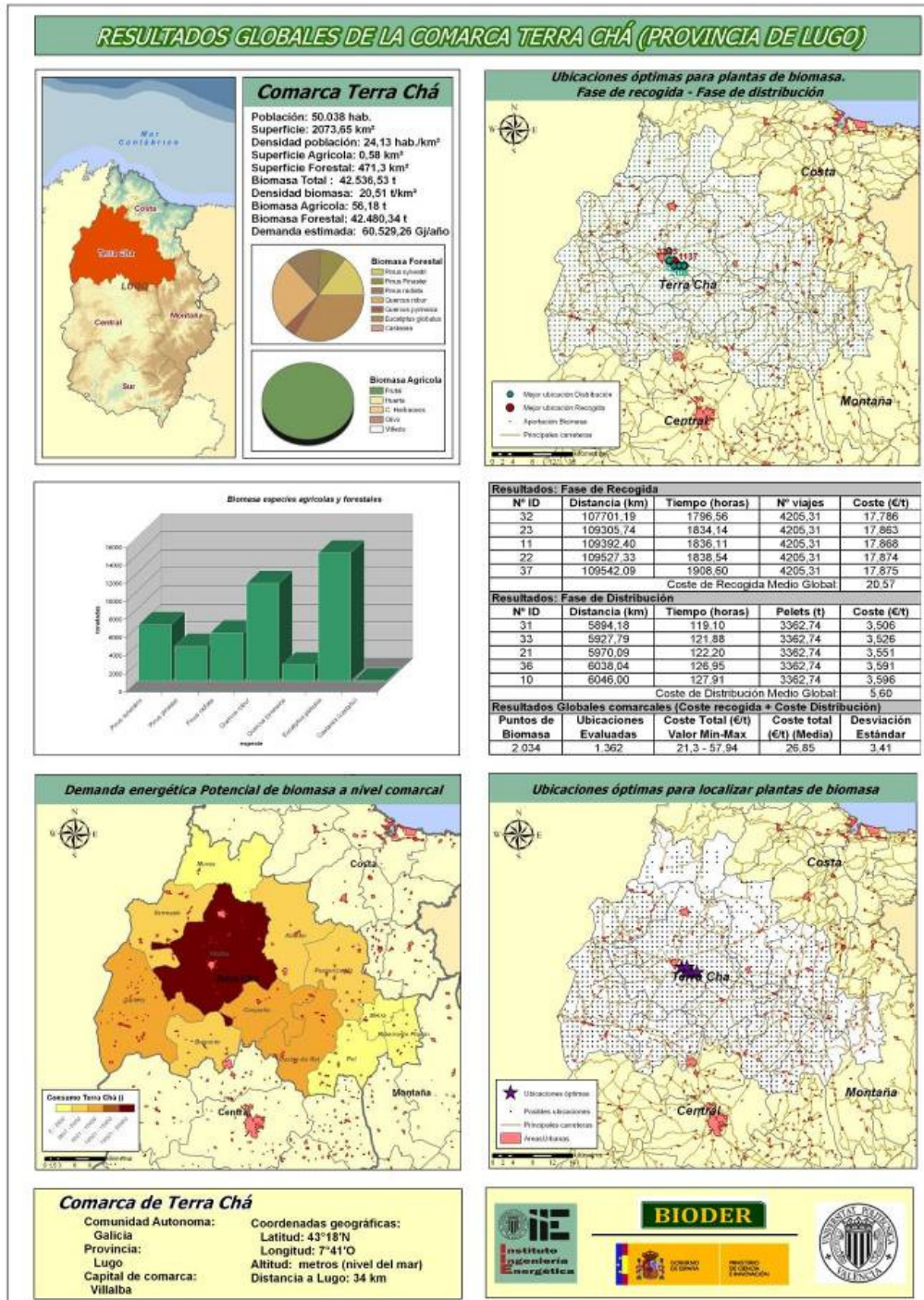


Figura 62. Resultado globales de la Comarca de Terra Chá

Resultados globales comarcales de la provincia de Ciudad Real (Castilla- La Mancha)

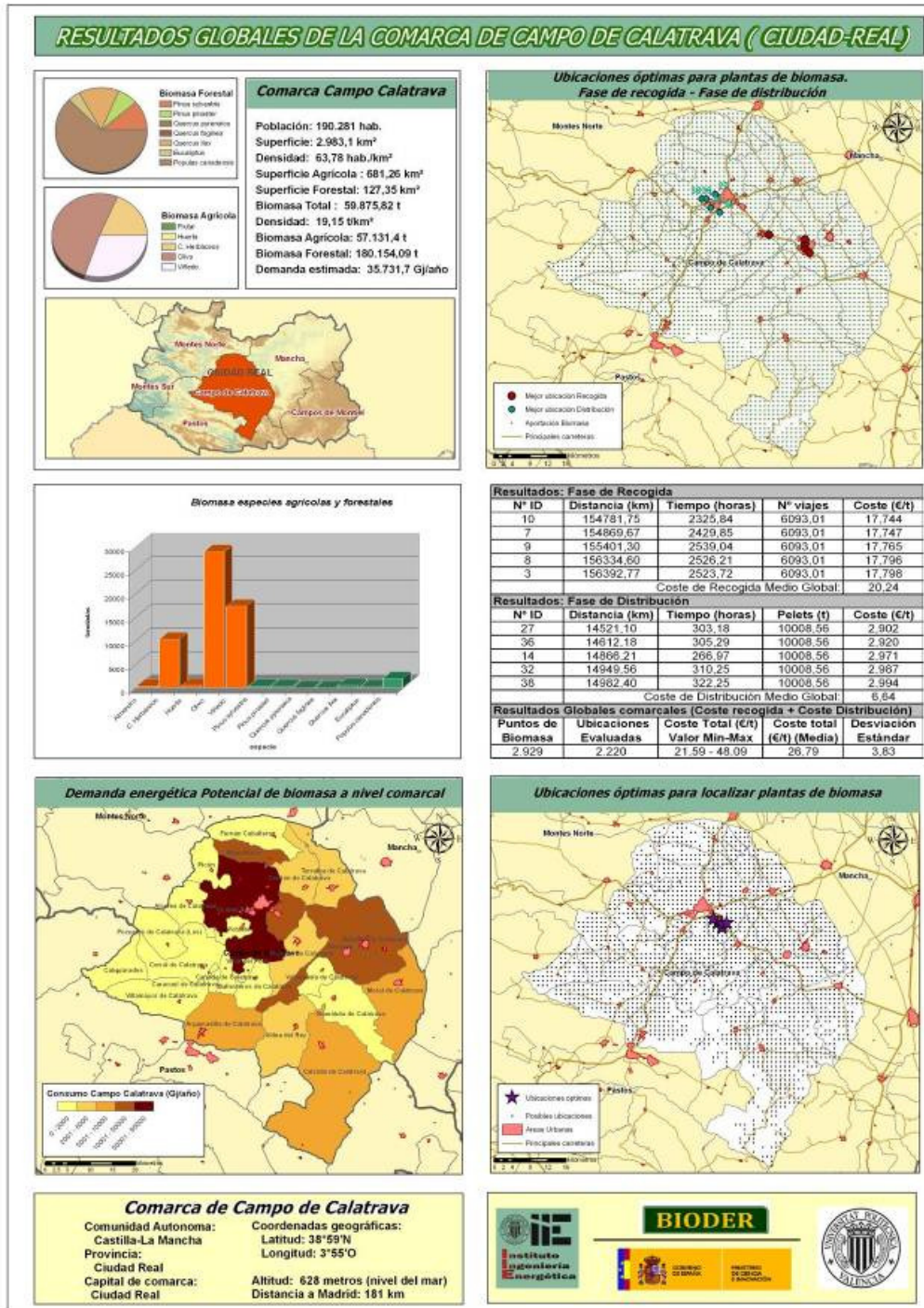


Figura 63. Resultado globales de la Comarca de Campo de Calatrava

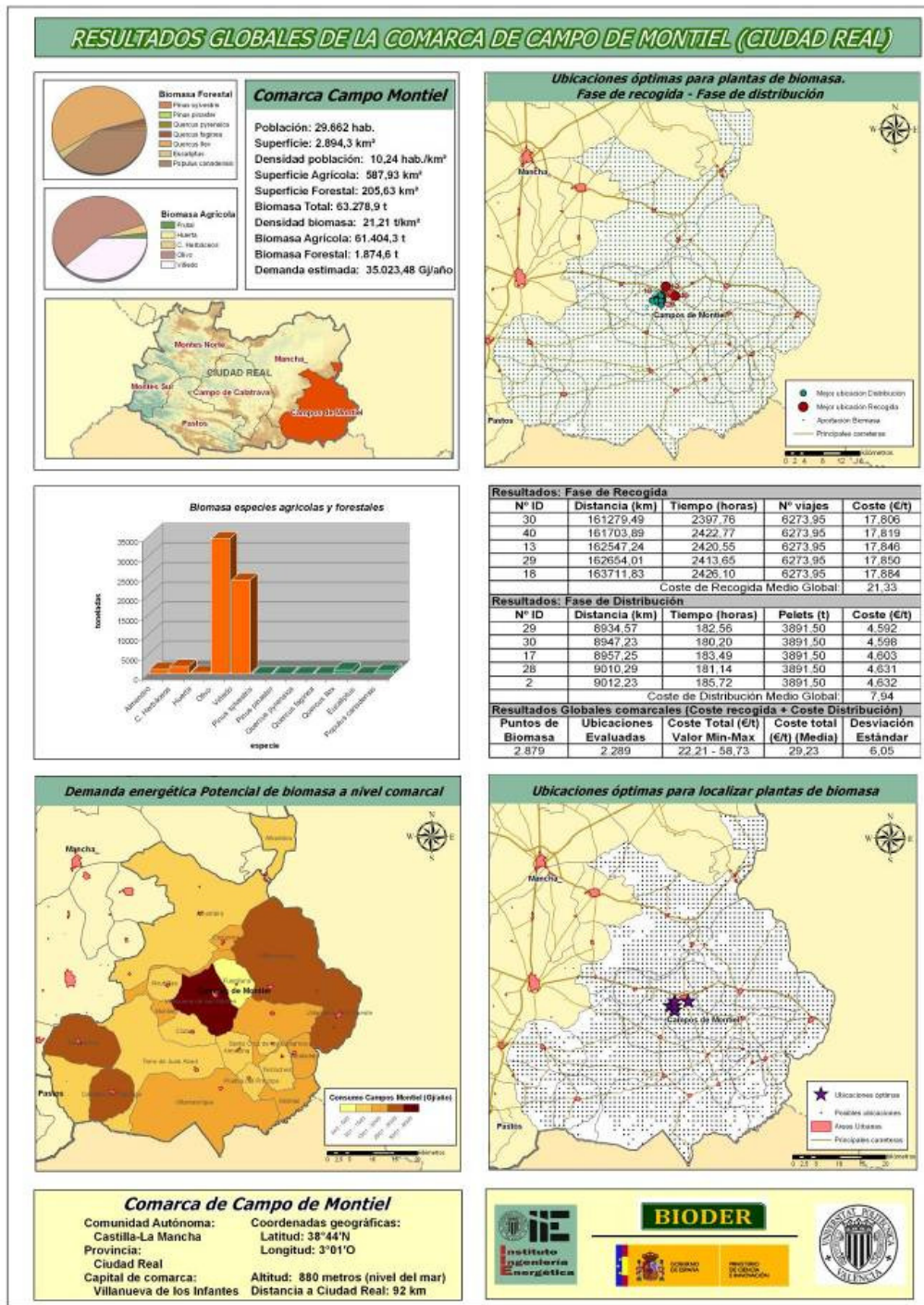


Figura 64. Resultado globales de la Comarca de Montiel

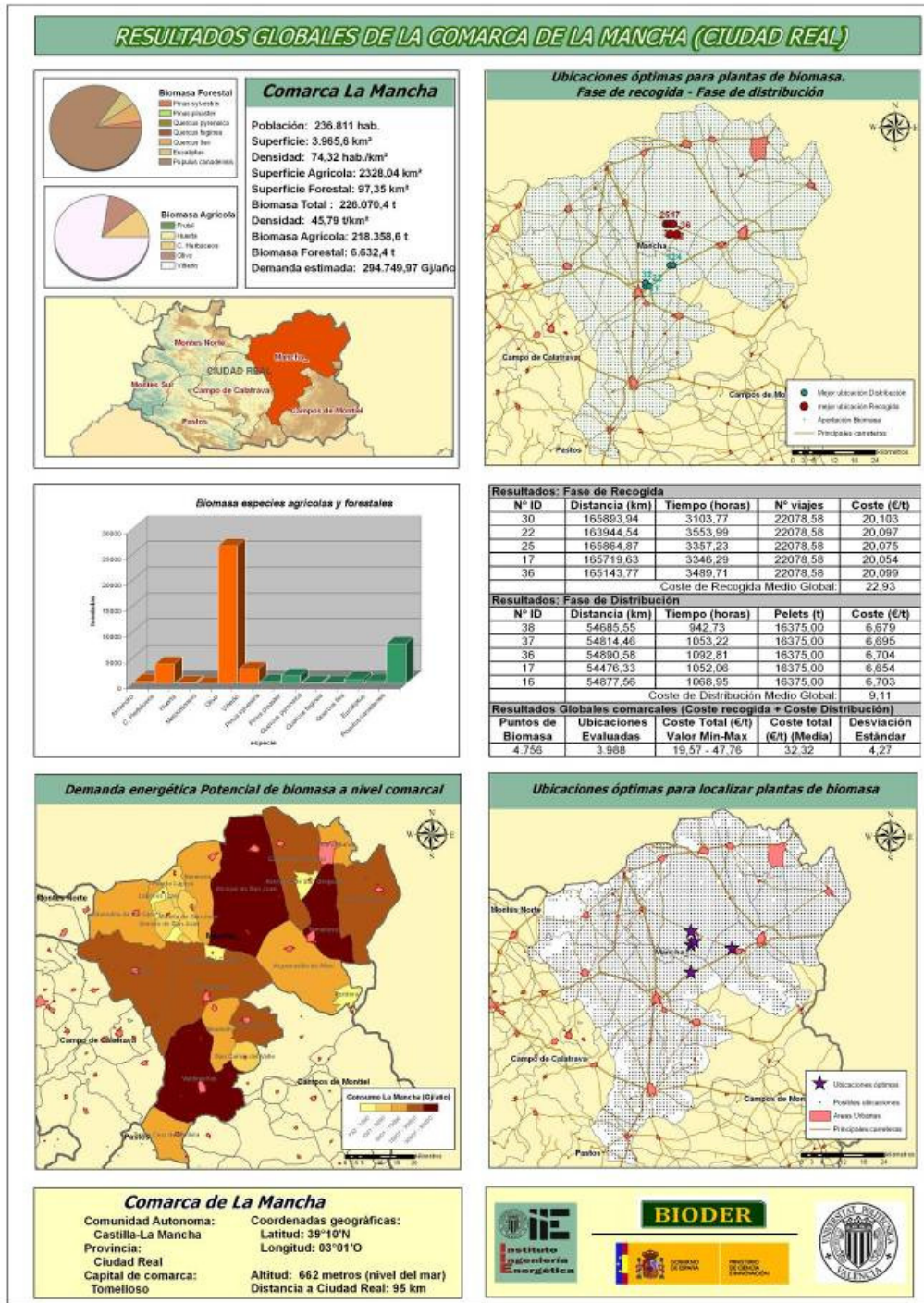


Figura 65. Resultado globales de la Comarca de La Mancha



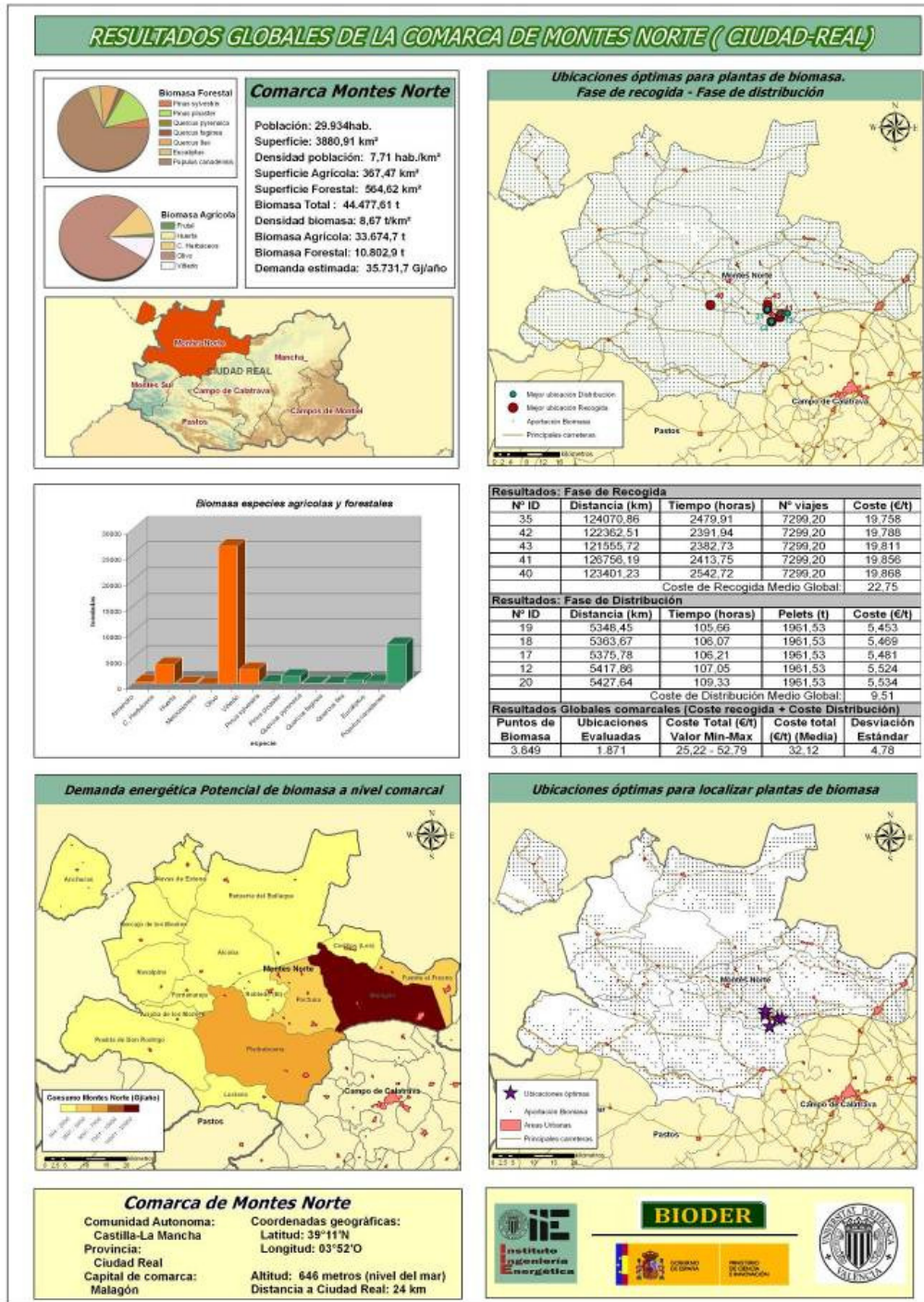


Figura 66. Resultado global de la Comarca de Montes Norte

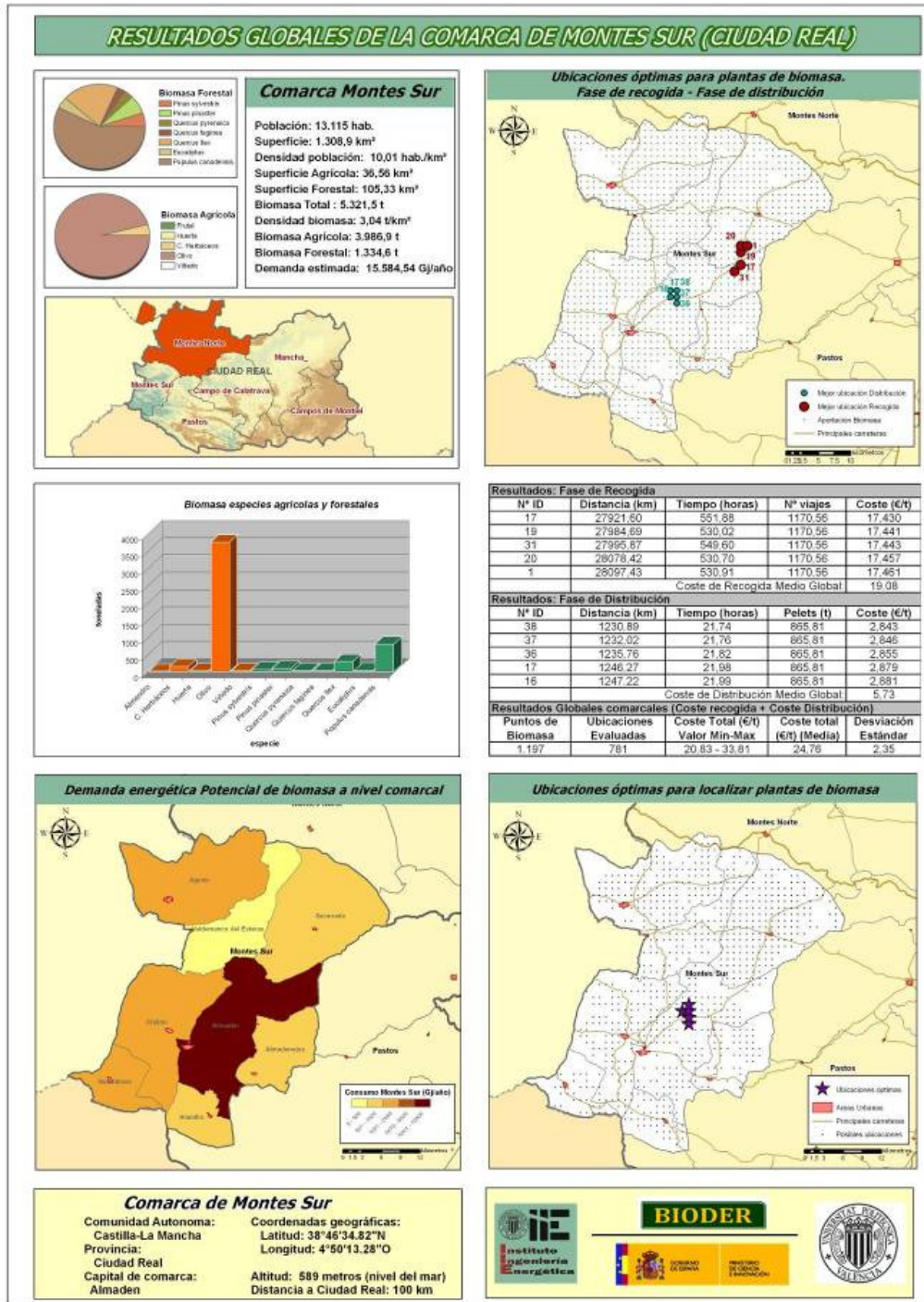


Figura 67. Resultado globales de la Comarca de Montes Sur

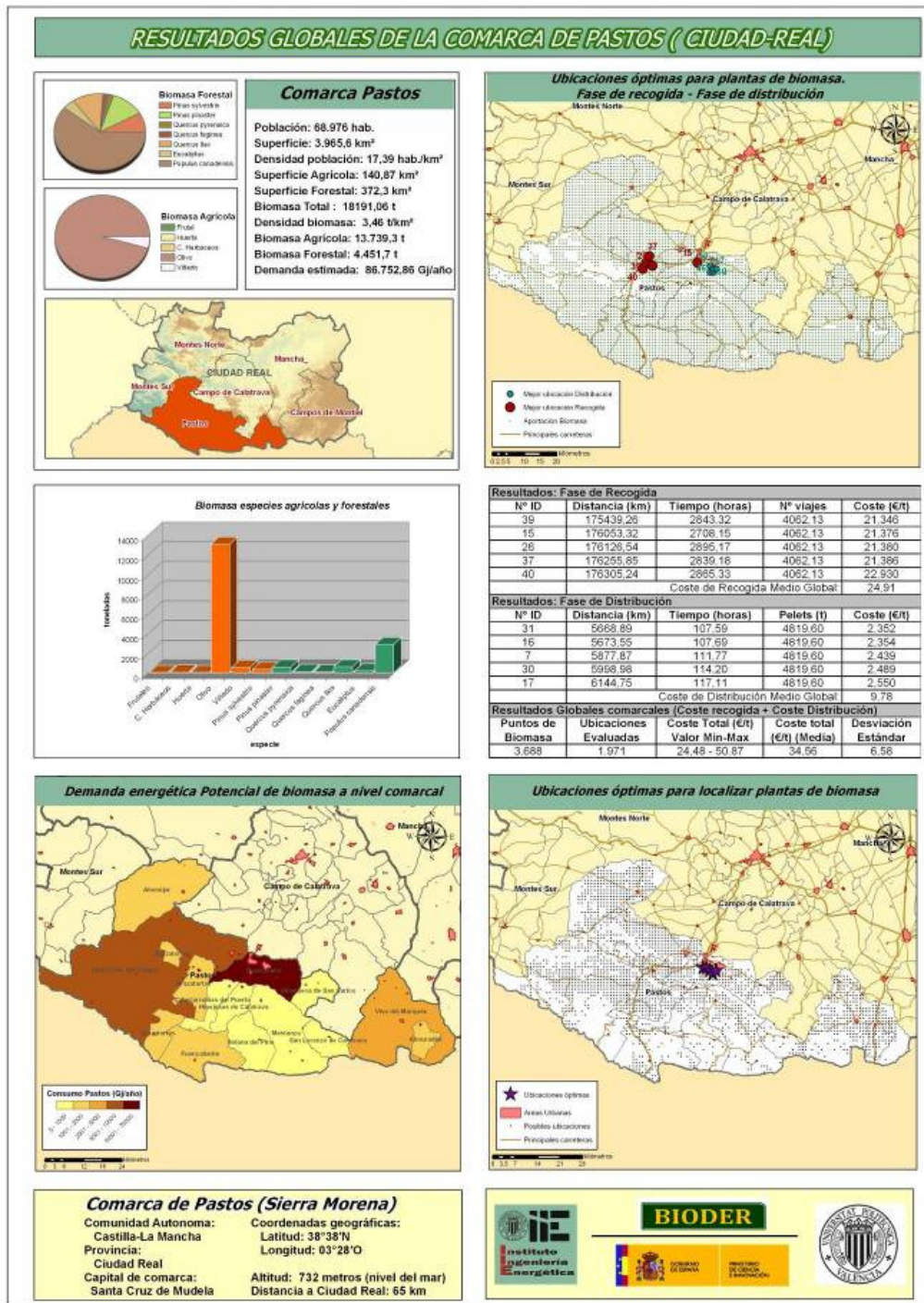


Figura 68. Resultado globales de la Comarca de Pastos



---

**ANEXO III**

**MATRICES DE COMPARACIÓN POR PARES DE LOS  
FACTORES EMPLEADOS EN LA EMC**

---



A continuación se justifican y se representan cada uno de los factores que se ha empleado en la evaluación multicriterio, acompañado por su matriz de comparación por pares. Esta es una de las fases más significativa puesto que el objetivo de la misma es valorar cada clase, es decir, darle una componente cuantitativa.

### 1. Pendiente del terreno

1. PENDIENTE DEL TERRENO					
Clases	1	2	3	4	Valor ij
1	1	2	3	8	<b>0,44</b>
2	1/2	1	2	7	<b>0,29</b>
3	1/3	1/2	1	7	<b>0,19</b>
4	1/8	1/7	1/7	1	<b>0,09</b>

**Tabla 65. Matriz de comparación por pares: Pendiente del terreno.  
Ratio de consistencia: 0,029**

- 1- Pendiente comprendida entre 0% y 5%
  - 2- Pendiente comprendida entre 5% y 10%
  - 3- Pendiente comprendida entre 10% y 15%
  - 4- Pendiente comprendida entre 15% y 35%
- En pendientes mayores de 35% no se permite la localización de instalaciones

Para clarificar la interpretación de estas matrices, tomemos un ejemplo de la Tabla 65. Si nos fijamos en la clase 4 (Pendiente entre 15% y 35%) es 1/8 de veces menos apta para la ubicación de una planta de biomasa que la clase 1, lo que recíprocamente la clase 1 es ocho veces mejor opción para ubicar una planta que la clase 4.

Algunos autores como W. M. Marsh (Consejería de Urbanismo Ayuntamiento de Marbella; Marbella), en relación con la actividad del hombre, definen así mismo ciertos rangos para las pendientes y su dedicación:

- Pendientes inferiores a 5° (< 9%): con esta pendiente no hay problemas de tipo geomorfológico, y el terreno se puede dedicar a los usos más intensivos.
- Pendientes entre 5 y 15° (9-27%): en este rango de pendiente se incluyen aquellos terrenos dedicados a usos agrarios o urbanos, que siguiendo prácticas incorrectas o inadecuada explotación del mismo se pueden desencadenar procesos erosivos de cierta gravedad.
- Pendientes entre 15 y 25° (27-47%): una disminución de la cubierta vegetal puede generar grave peligro de erosión, pérdida del sustrato edáfico y procesos geomorfológicos que provoquen la ablación del terreno, como el acarcavamiento.
- Pendientes superiores a 25° (> 47%): hay un grave peligro de deslizamiento si sobre estos terrenos se realizan determinadas construcciones o labores de remoción.

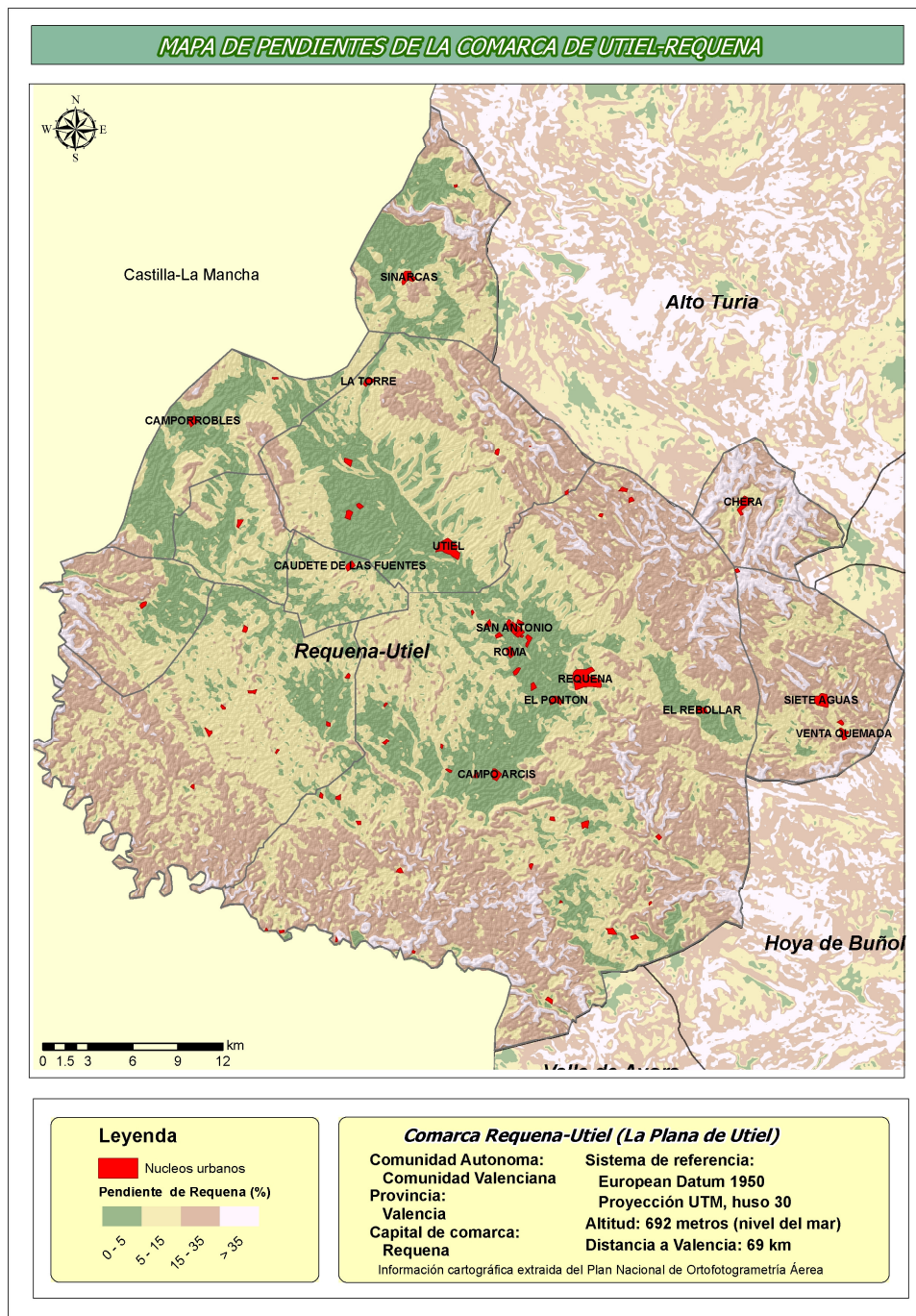


Figura 69. Mapa de pendientes de la Comarca de Utiel-Requena



## 2. Litología

Atendiendo a lo establecido por Cendrero en la obra Litología y aprovechamiento de rocas industriales y riesgo de deslizamiento en la Comunidad Valenciana (Conselleria d'obres públiques urbanisme y transport 1998), en la clasificación que realiza de diferentes unidades litológicas según las propiedades físicas y a su incidencia sobre la capacidad del territorio para albergar una actividad industrial. Las propiedades que intervienen en la determinación de la capacidad litológica del territorio para un uso industrial del mismo son las siguientes, y se concluye que las mejores propiedades físicas para una actividad industrial se encuentran en las arcillas y yesíferas, teniendo en cuenta:

- Permeabilidad: destacan arcillas, yesíferas y margas
- Estabilidad en pendientes: destacan las areniscas, dolomías y calizas
- Facilidad de excavación: destacan arcillas, margas, yesíferas

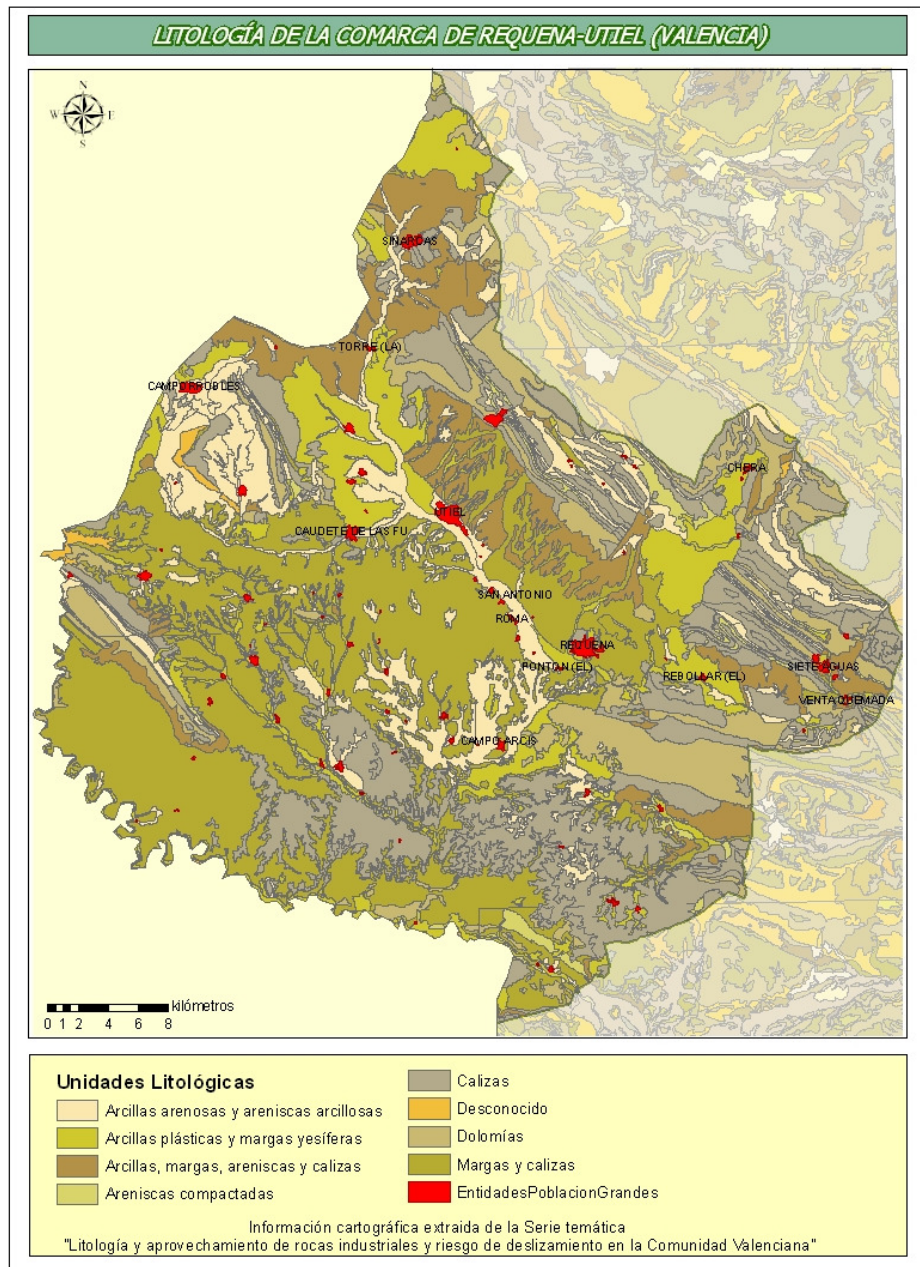
Potencial de extracción y expansión : arcillas, margas, yesíferas

2. LITOLOGÍA									
Clases	1	2	3	4	5	6	7	8	Valor $\bar{v}_i$
1	1	1	1	1/5	1/5	1/7	1/9	1/5	<b>0,02</b>
2	1	1	1/5	1/5	1/5	1/7	1/9	1/5	<b>0,03</b>
3	5	5	1	1	1	1/5	1/6	1	<b>0,04</b>
4	5	5	1	1	1	1/5	1/6	1	<b>0,08</b>
5	5	5	1	1	1	1/5	1/6	1	<b>0,09</b>
6	7	7	6	6	4	1	1/3	4	<b>0,24</b>
7	9	9	8	8	8	3	1	6	<b>0,39</b>
8	5	5	1	1	1	1/5	1/6	1	<b>0,11</b>

**Tabla 66. Matriz de comparación por pares: Litología.**  
Ratio de consistencia: 0,05

La clasificación de la litología viene definida a partir de los grupos que se muestran, siendo estos: Rocas sedimentarias consolidadas y no consolidadas, Rocas metamórficas y Rocas volcánicas. No obstante, destacaremos que las distintas unidades litológicas presentes en la zona a estudio han sido reagrupadas, atendiendo a la clasificación establecida por Cendrero.

- 1- Calizas SC5 – SC6 – SC7 – SC8
- 2- Dolomías SC9
- 3- Margas y calizas SC10 – SC12
- 4- Cuarcitas M1
- 5- Areniscas compactas SC2 – SC4
- 6- Arcillas arenosas y areniscas arcillosas SI3 – SI4 – SI5
- 7- Arcillas plásticas y margas yesíferas SI2
- 8- Alternancia de arcillas, margas, areniscas y calizas SC1



**Figura 70. Unidades Litológicas en la Comarca de Utiel-Requena**

La clasificación general de las diferentes litologías en los cuatro grupos generales según la literatura revisada se muestra en la Tabla 67.

ROCAS SEDIMENTARIAS CONSOLIDADAS	- SC 1: conglomerados - SC 2: areniscas - SC 4: arcillas - SC 5: calcáreas - SC 6: calcarenitas - SC 7: calcáreas margosas - SC 8: calcáreas tofaceas - SC 9: dolomías - SC 10: margas - SC 12: arcillas, margas y yesos
ROCAS SEDIMENTARIAS NO CONSOLIDADAS	- SI 2: cantos y gravas - SI 3: arenas - SI 4: limos - SI 5: arcillas
ROCAS METAMÓRFICAS	- M-1: pizarras y cuarcitas - M-2: rocas carbonatadas y filitos - M-3: metabasitos
ROCAS VOLCÁNICAS	- V-1: basaltos. - V-2: ofitas. - V-3: brechas y tobas volcánicas

**Tabla 67. Clasificación general de la litología. Fuente:(Conselleria d'obres públiques urbanisme y transport 1998)**

### 3. Tipos de cultivos

Los diferentes tipos de cultivos deben ser respetados en la medida de lo posible y para ello se deben puntuar de acuerdo a su interés económico o ecológico para la conservación. A continuación se muestran las cinco clases en las que se ha dividido de manera general los tipos de cultivos.

3. TIPOS DE CULTIVOS						
Clases	1	2	3	4	5	Valor $\bar{ij}$
1	1	2	3	5	8	<b>0,43</b>
2	1/2	1	2	4	6	<b>0,27</b>
3	1/3	1/2	1	3	5	<b>0,18</b>
4	1/5	1/4	1/3	1	2	<b>0,07</b>
5	1/8	1/6	1/5	1/2	1	<b>0,04</b>

**Tabla 68. Matriz de comparación por pares: Tipos de cultivos. Ratio de consistencia: 0,016**

1- Regadío 2- Árboles frutales 3- Viñedo 4- Mosaicos de cultivos 5- Secano y labor

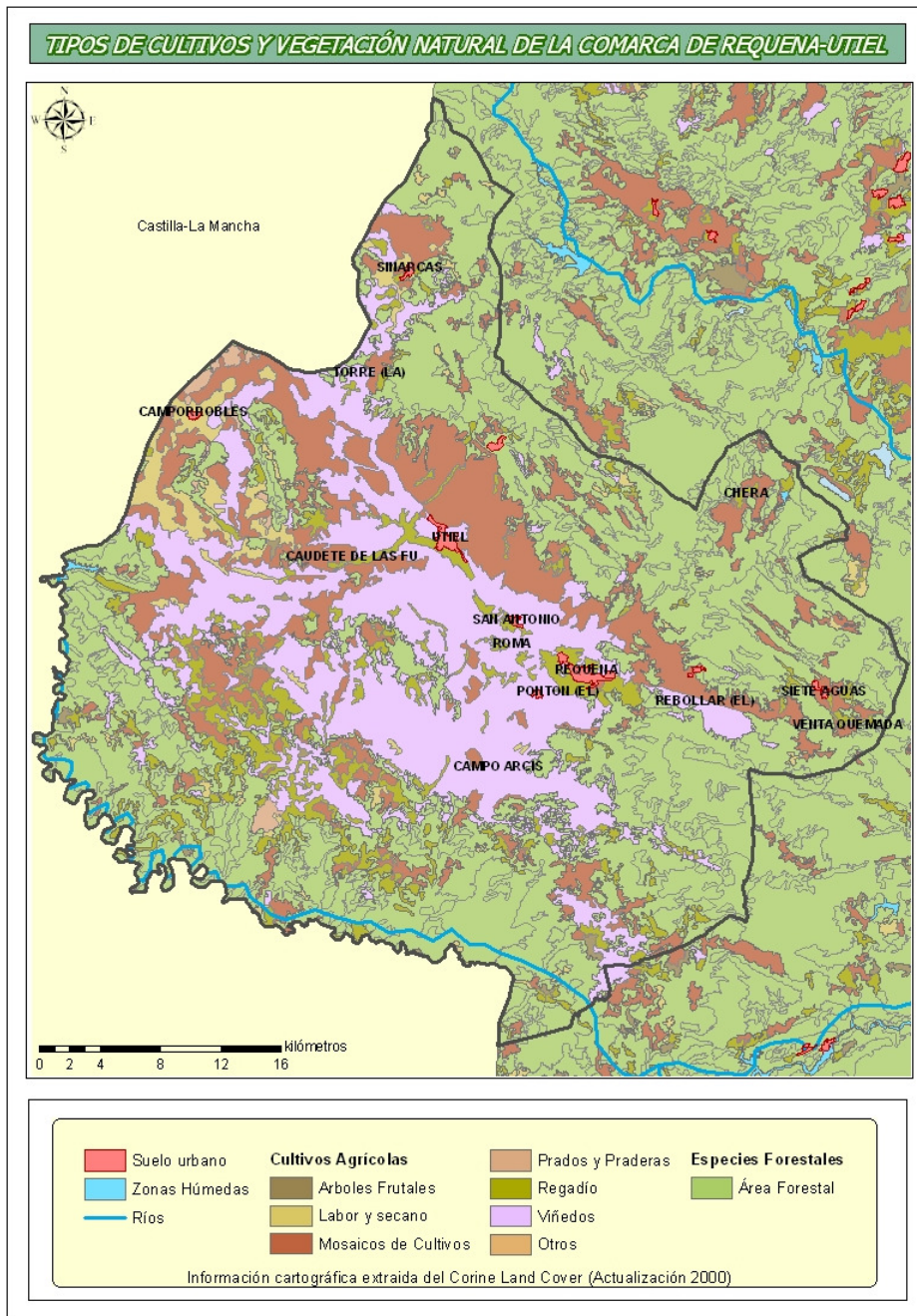


Figura 71. Tipos de Cultivos y especies forestales en la Comarca de Utiel-Requen

#### 4. Cobertura vegetal natural

La cobertura vegetal tiene un papel muy importante en lo que respecta a estabilidad. La vegetación es la encargada de mantener la estabilidad superficial del terreno y evitar su degradación, puesto que sus raíces mantienen la cohesión de las partículas del suelo y disminuyen la disgregación de los niveles superficiales. Además, la cobertura vegetal favorece el drenaje por la absorción del agua superficial del terreno y al mismo tiempo disminuye el efecto que produce la erosión hídrica. A continuación, se muestran las cuatro clases que forman parte de este factor y la valoración de las mismas<sup>53</sup>.

4. COBERTURA VEGETAL					
Clases	1	2	3	4	Valor $ij$
1	1	2	7	9	<b>0,04</b>
2	1/2	1	7	9	<b>0,09</b>
3	1/7	1/7	1	4	<b>0,36</b>
4	1/9	1/9	1/4	1	<b>0,51</b>

**Tabla 69. Matriz de comparación: Cobertura Vegetal.  
Ratio de consistencia: 0,0087**

- Estrato Arbóreo Protegido: hace referencia a aquella cobertura vegetal, que presenta algún tipo de legislación que la afecta, en cuanto, a la protección de la misma por su valor ecológico y paisajístico, ampliado por la alta biodiversidad que presenta esta formación en las zonas montañosas y destacando los valiosos ecosistemas que se conforman. En esta tipología de cobertura vegetal, se incluirán las siguientes especies naturales, Carracal, Sabinar, Gal·ler, Sureda, Roureda, Pinus Pinastre y Negre, Coscollar.
- Estrato Arbóreo Común: en esta categoría se incluirán los pinos de repoblación, pino rojo y pino blanco con menos protección que las especies anteriores pero claramente con tendencia a proteger.
- Estrato Arbustivo y Pastizal: Forman parte de esta clase la dominada por arbustos, matas y plantas herbáceas (brezos, zarzas, retamas, tojos, etc.) Estas muestran un valor inferior a las formaciones boscosa aunque debemos tener en cuenta la diversidad de hábitats de distintas especies faunísticas, además de ambientes no antrópicos, pero sin destacar aspectos de protección del suelo y paisajísticos.
- Resto de vegetación natural: aquí se incluirán todas aquellas especies vegetales que no hayan sido incluidas en las clasificaciones anteriores, como vegetación con cubierta baja y cerrada, así como espacios abiertos con escasa vegetación (sabana con chaparros y sabana abierta).

1- Frondosas y coníferas, 2- Otros estratos boscosos, 3- Estrato Arbustivo y boscoso, y  
4- Resto de vegetación natural

<sup>53</sup> En este factor los valores más altos corresponden al tipo de cobertura vegetal con mayor carácter conservativo, con lo cual en la capa temática los valores se introducirán en orden inverso.

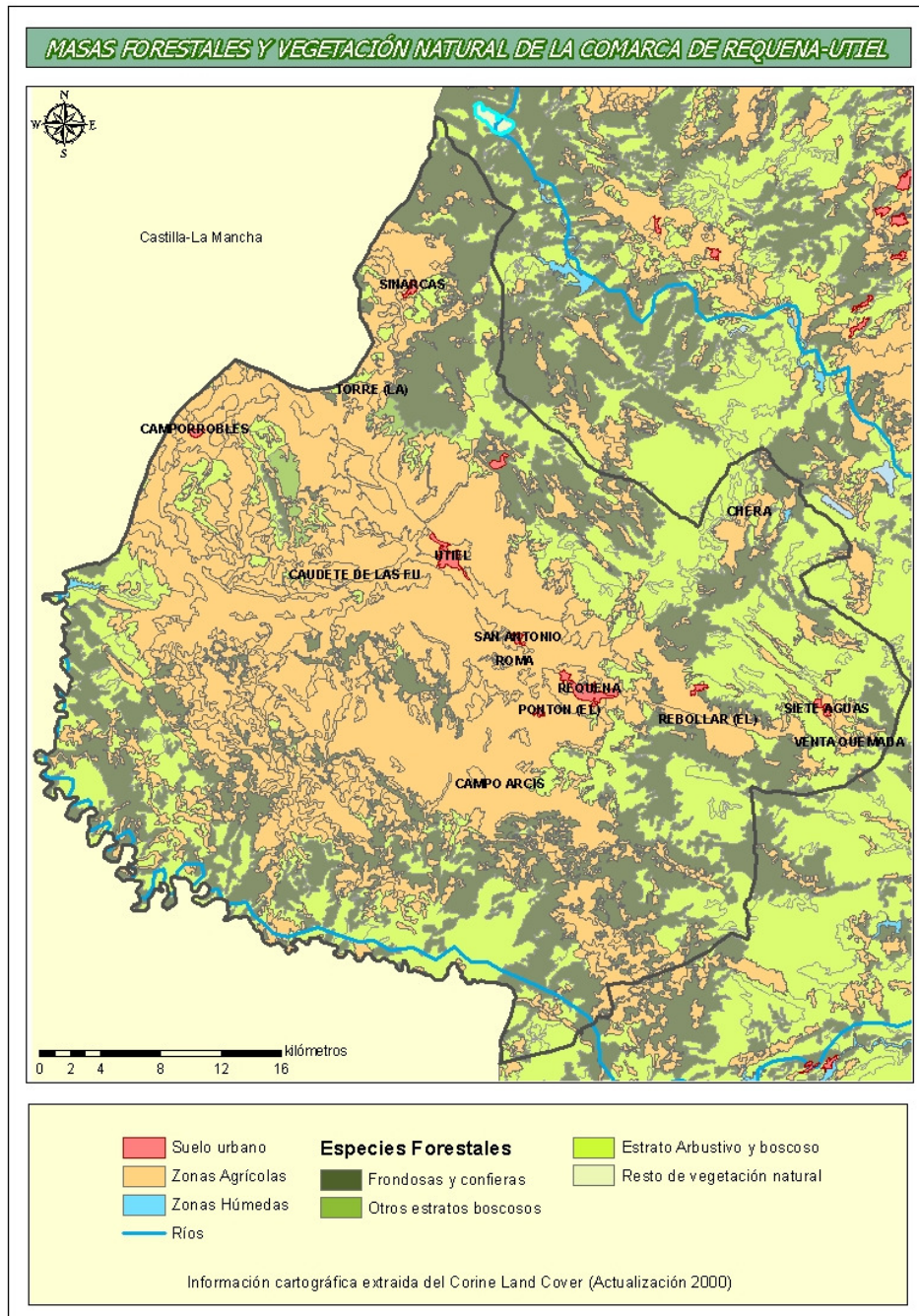


Figura 72. Cobertura vegetal natural de la Comarca de Utiel-Requena

### 5. Accesibilidad a la red de transporte

El factor de accesibilidad a la red vial se evaluará mediante una capa de distancias a las vías que se emplean en el análisis. Los espacios accesibles a la red vial establecida en la zona de estudio se identificarán a partir de tres zonas de accesibilidad, donde los lugares más próximos a las actuales vías de comunicación, sobre todo autopistas y autovías, son los más adecuados para construir nuevas industrias. El principal motivo es porque resulta más económico y practicable llevar hasta allí las materias primas y sacar el producto generado (en este caso pellets).

A partir de las tres zonas de accesibilidad podemos establecer los valores de preferencia entre cada par, estableciendo así la matriz de comparación por pares para obtener los valores  $x_{ij}$  de cada zona de accesibilidad

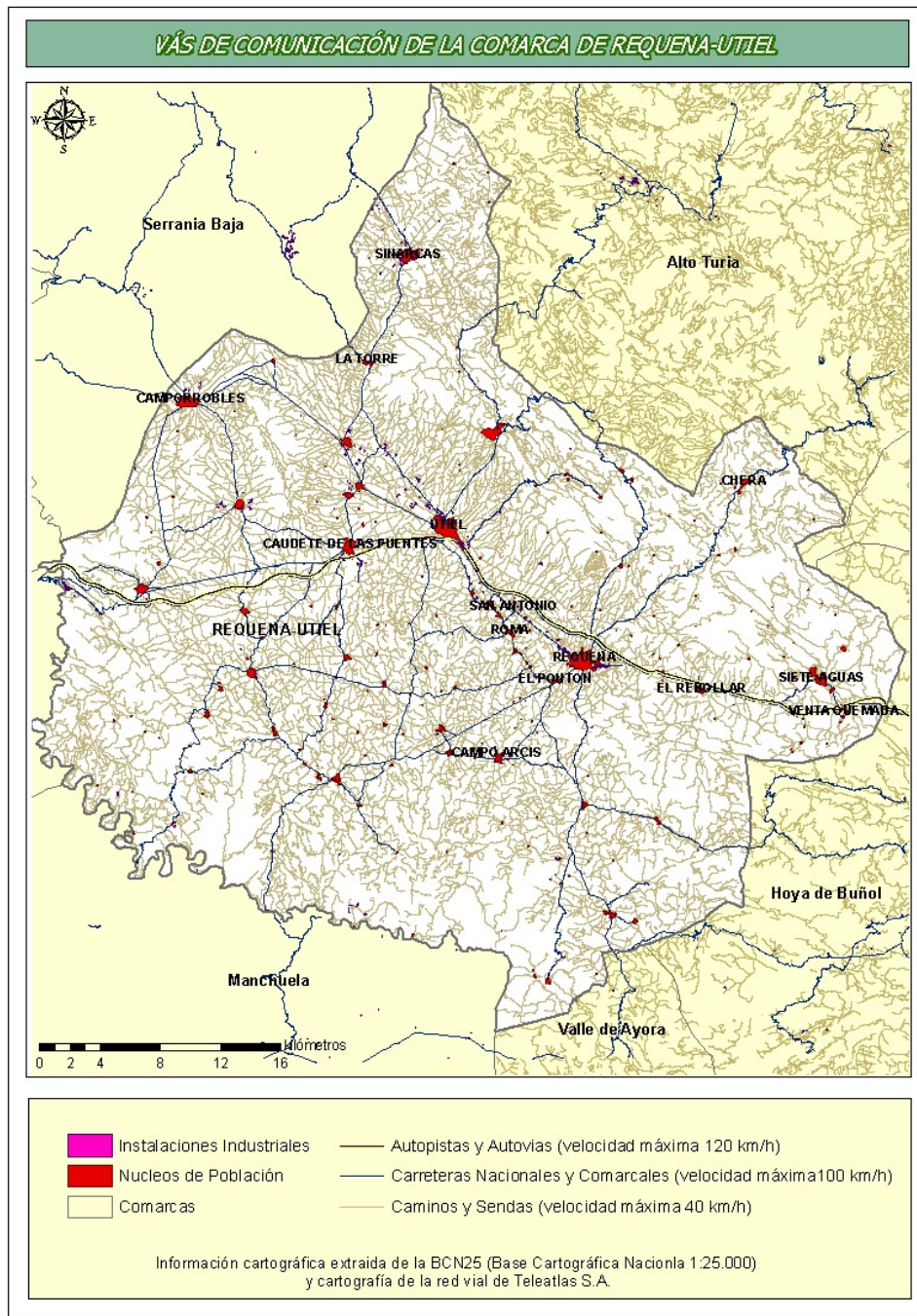
- Autopistas y Carreteras nacionales: Accesibilidad alta, entre 0 -1 kilómetro
- Autopistas y Carreteras nacionales: Accesibilidad media, entre 1-5 kilómetros
- Autopistas y Carreteras nacionales: Accesibilidad baja, mayor de 5 kilómetros
- Caminos y sendas: Accesibilidad alta, entre 0 - 0,5 kilómetros
- Caminos y sendas: Accesibilidad media, entre 0,5 - 3 kilómetros
- Caminos y sendas: Accesibilidad baja, mayor de 3 kilómetros

5. ACESIBILIDAD A LA RED VIAL EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA				
Clases	1	2	3	Valor $ij$
1	1	3	7	<b>0,659</b>
2	1/3	1	4	<b>0,263</b>
3	1/7	1/4	1	<b>0,079</b>

**Tabla 70. Matriz de comparación por pares: Accesibilidad a la Red vial.  
Ratio de consistencia: 0,03**

En esta matriz, las clases 1,2 y 3 representan el nivel de accesibilidad, pudiendo ser ésta:

- 1- Accesibilidad Alta
- 2- Accesibilidad Media
- 3- Accesibilidad Baja



**Figura 73. Red de Comunicación de la Comarca Utiel-Requena**



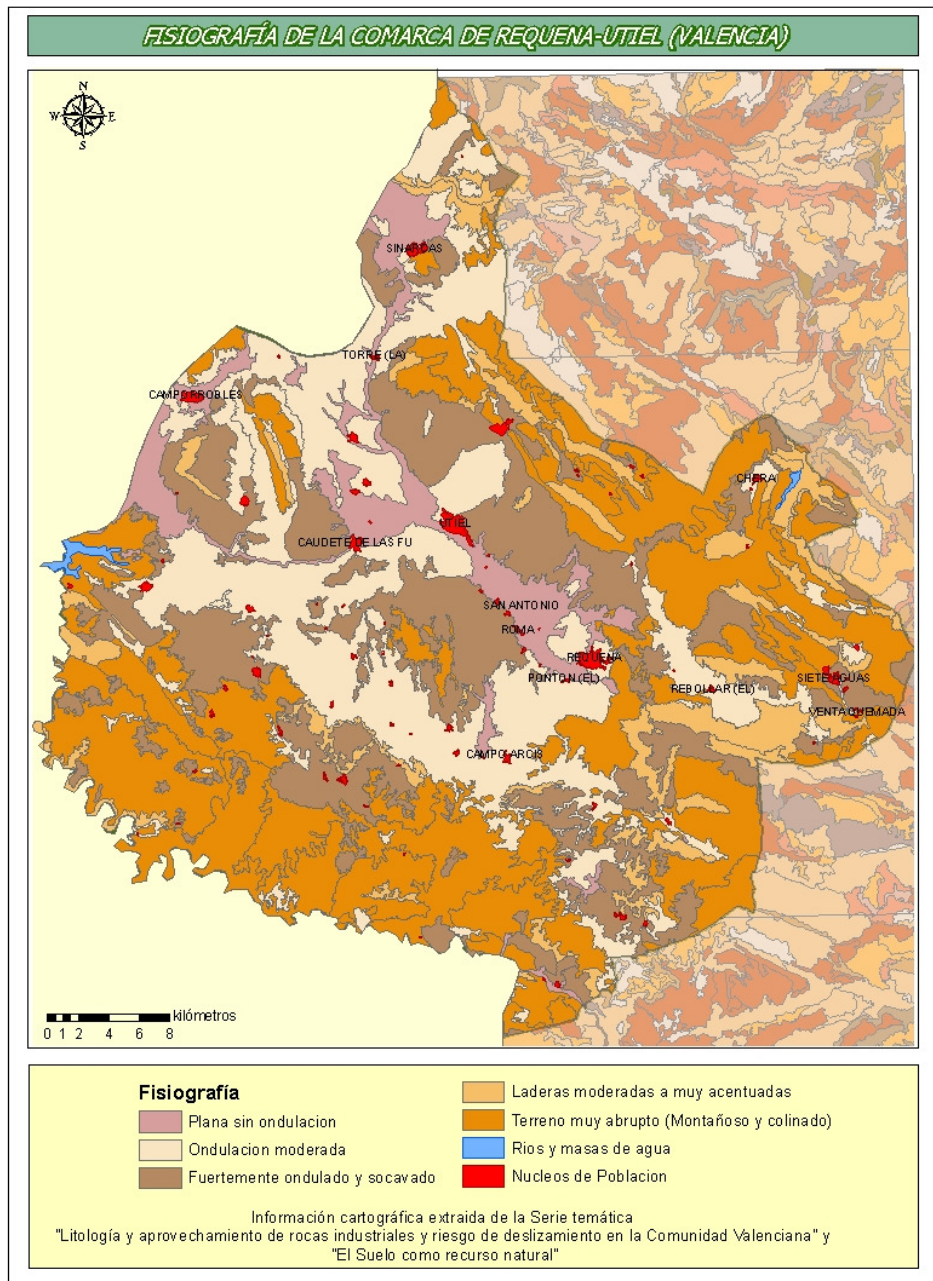
### 6. Fisiografía. Unidades homogéneas del relieve

Aunque la pendiente topográfica puede considerarse el principal elemento restrictivo para determinadas actividades humanas sobre el territorio, las características morfológicas de la ladera también condicionan el desarrollo de procesos de deslizamiento por su contribución a la inestabilidad de los materiales. También debemos considerar relevante, a la hora de evaluar la inestabilidad del terreno y los procesos de erosión, la rugosidad del relieve para el asentamiento de una actividad.

<b>6. FISIOGRAFÍA. UNIDADES HOMOGÉNEAS DEL RELIEVE</b>						
Clases	1	2	3	4	5	Valor $\lambda_{ij}$
1	1	3	5	7	9	<b>0,513</b>
2	1/3	1	3	5	7	<b>0,261</b>
3	1/5	1/3	1	3	5	<b>0,129</b>
4	1/7	1/5	1/3	1	3	<b>0,063</b>
5	1/9	1/7	1/5	1/3	1	<b>0,033</b>

**Tabla 71. Matriz de comparación por pares: unidades homogéneas del relieve.  
Ratio de consistencia:**

- 1- Zonas planas sin ondulaciones
- 2- Ondulación suave-moderada
- 3- Fuertemente ondulado y socavado
- 4- Laderas moderadas-acentuadas
- 5- Zonas abruptas (montañoso y colinado)



**Figura 74. Fisiografía de la Comarca de Utiel-Requena**

### 7. Recursos biomásicos disponibles

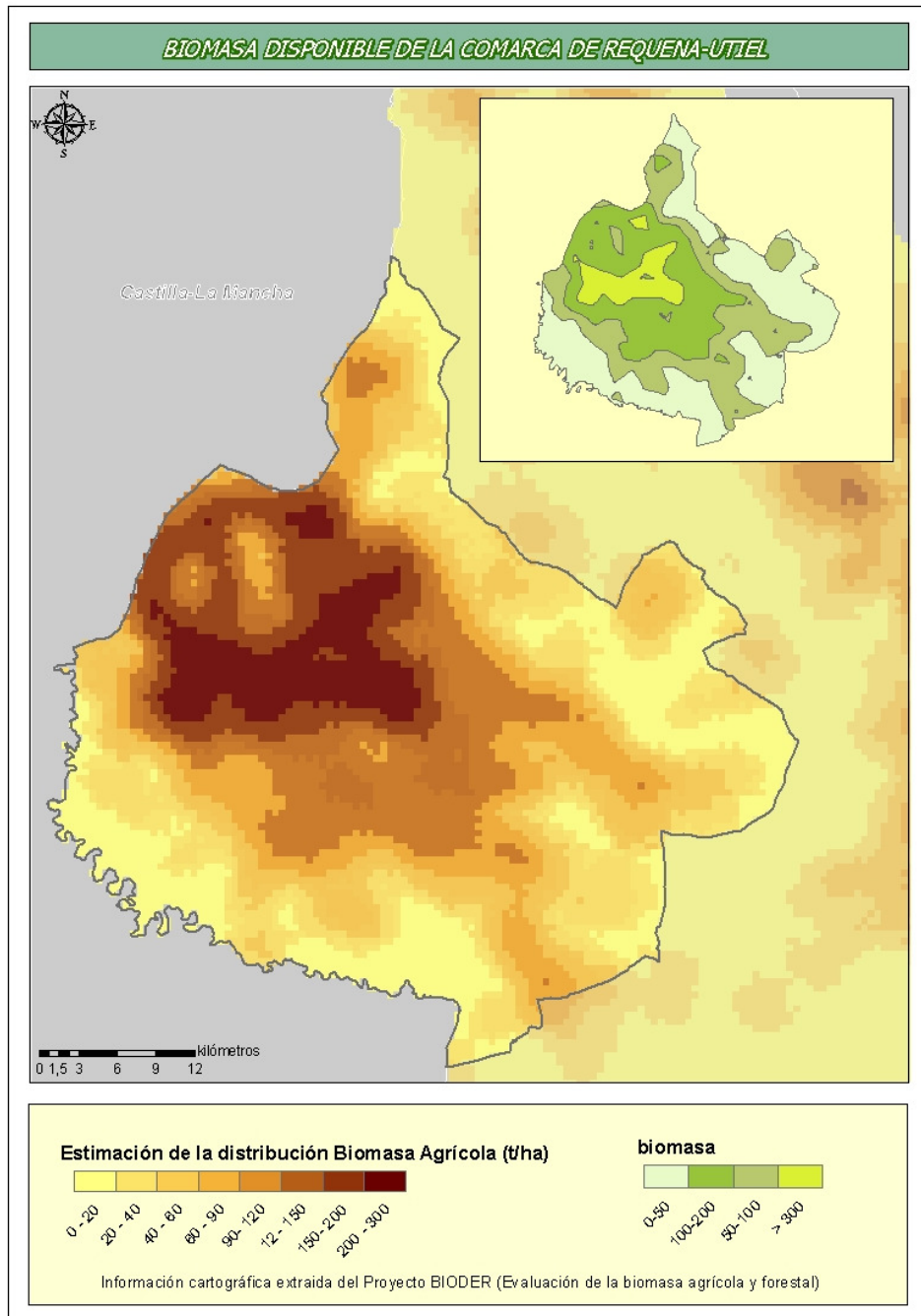
La biomasa para fines energéticos es un recurso natural limitado, local y además se encuentra espacialmente distribuido de un modo heterogéneo. Esta distribución espacial dificulta enormemente las tareas de recogida del residuo así como la logística y el transporte del mismo hasta las plantas de bioenergía, aumentando considerablemente los costes totales y siendo un obstáculo para su identificación y gestión. Respecto al tipo de recurso biomásico, han sido los residuos agrícolas y forestales los estudiados y evaluados en la comarca de Utiel-Requena, tal y como se detalla en la metodología desarrollada para tal fin en el Anexo II.

De modo que para la determinación de las zonas más adecuadas para la localización de una planta de biomasa es necesario tener en cuenta el origen de la biomasa. Por ello, para la realización de este estudio, se agrupa la biomasa disponible en cuatro grupos significativos teniendo más importancia aquel donde se concentra mayor biomasa.

7. RECURSO BIOMÁSICO DISPONIBLE					
Clases	1	2	3	4	Valor $\lambda_j$
1	1	1/3	1/5	1/9	<b>0,041</b>
2	3	1	1/4	1/7	<b>0,110</b>
3	5	4	1	1/4	<b>0,288</b>
4	9	7	4	1	<b>0,561</b>

**Tabla 72. Matriz de comparación por pares: Recursos biomásicos disponibles.  
Ratio de consistencia: 0,07**

- 1- Biomasa disponible entre 0-50 toneladas
- 2- Biomasa disponible entre 50-100 toneladas
- 3- Biomasa disponible entre 100 – 200 toneladas
- 4- Biomasa disponible entre 200 - 300 toneladas



**Figura 75. Biomasa disponible (t/ha) en la Comarca de Utiel-Requena**

### 8. Desarrollo económico local

El desarrollo económico de la zona se determina en función de la superficie ocupada por suelo industrial en el área de estudio, de la densidad de población y de la superficie del municipio.

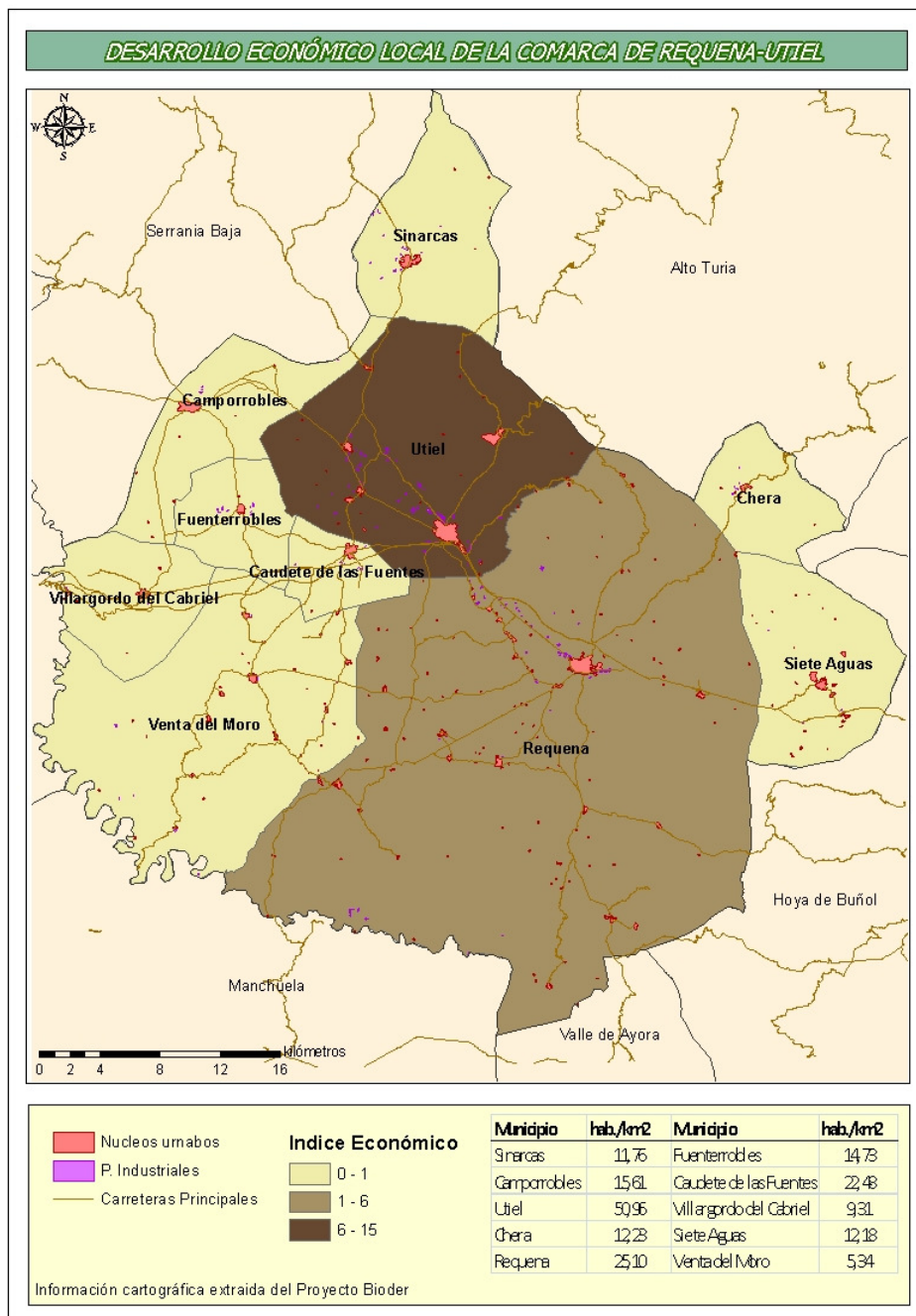
Mediante este factor que se representa a partir de un indicador, donde a mayor valor más desarrollado está el municipio, se pretende medir el grado de desarrollo local de la zona de una manera aproximada y mediante rangos determinados a partir de las clases que se presentan a continuación. También se tiene en cuenta las instalaciones eléctricas ya localizadas en cada municipio como: térmica, eólica, solar, nuclear e hidráulica. Las instalaciones industriales consideradas se agrupan en: nave, corral, granja, piscifactoría, silo, tentadero y palomar, aunque prácticamente en su totalidad en esta área están catalogadas como nave industrial.

Otro elemento importante que denota desarrollo económico del área es la presencia de autovías y autopistas, así como otras redes de comunicación de relevancia. Este elemento es fundamental a la hora de recoger o distribuir la biomasa, puesto que una buena accesibilidad a la red y unas condiciones viales adecuadas facilitan esta labor y reducen los costes. Esta consideración se ha tratado de plasmar mediante la accesibilidad a la red vial vista anteriormente.

8. DESARROLLO ECONÓMICO LOCAL				
Clases	1	2	3	Valor $\bar{ij}$
1	1	1/3	1/5	0,11
2	3	1	1/4	0,22
3	5	4	1	0,67

**Tabla 73. Matriz de comparación por pares: Desarrollo económico.  
Ratio de Consistencia: 0,00014**

- 1- Desarrollo económico del municipio: Indicador entre 0 - 1
- 2- Desarrollo económico del municipio: Indicador entre 1 - 6
- 3- Desarrollo económico del municipio: Indicador entre 6 – 15



**Figura 76. Desarrollo Económico municipal de la Comarca de Utiel-Requena**

### 9. Demanda potencial local

En la demanda potencial del área de estudio influye el consumo local y la ubicación de los núcleos de población respecto a dónde se origine la biomasa.

Se ha representado el consumo a nivel municipal teniendo en cuenta la población estimada para el año 2007 y la superficie industrial. El indicador principal utilizado ha sido el consumo de energía primaria per cápita (tep/cápita) (Pérez-Navarro 2008).

Para calcular el consumo energético municipal se toma como población estimada de Utiel-Requena 41.163 habitantes para el año 2007. Puesto que el Sector Industrial y el Sector No Industrial (resto de sectores: residencial, comercial, transporte...) contribuyen de manera distinta en dicho consumo se realiza el cálculo a partir de esta diferenciación.

Respecto al Sector No Industrial se obtiene un consumo de 2,31 tep/hab con lo que conociendo el número de habitantes de cada municipio se obtiene el consumo a nivel municipal (ktep) que es de 95,08 ktep.

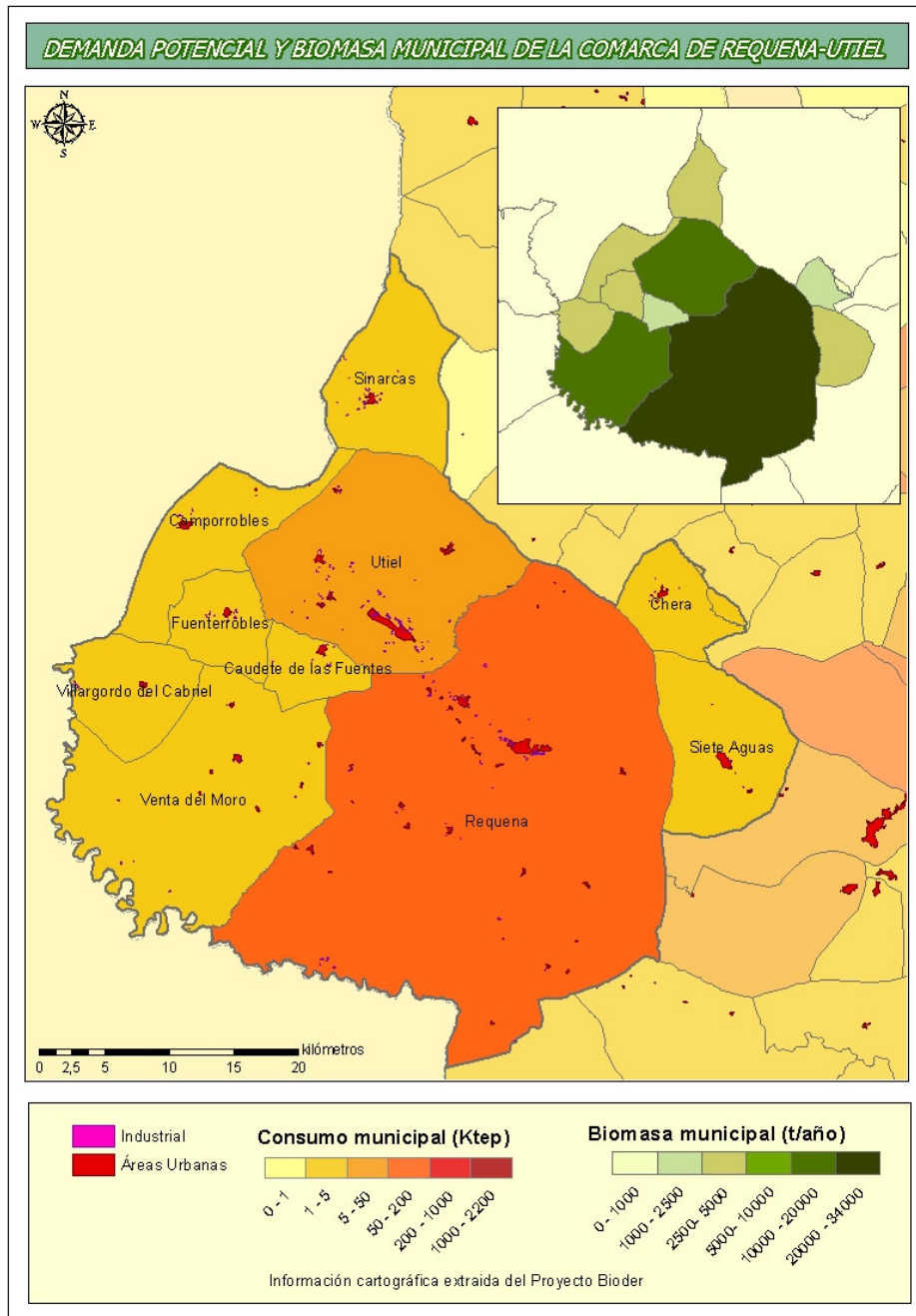
En lo referente al Sector Industrial, el cálculo se basa principalmente en el porcentaje de ocupación de suelo industrial (polígonos industriales) en km<sup>2</sup> que existen en cada municipio. En la comarca de Utiel-Requena el suelo industrial identificado en la cartografía asciende a 0,38 km<sup>2</sup>, y puesto que el consumo industrial es de 16,30 ktep, obtenemos un valor de 42,89 ktep/km<sup>2</sup>. La superficie de suelo industrial se utiliza como factor de reparto del consumo del sector industrial, por tanto, conociendo los kilómetros cuadrados de suelo industrial existentes en cada municipio, conocemos el consumo industrial a nivel municipal.

Finalmente, la suma del consumo del Sector No Industrial y del Sector Industrial totaliza el consumo energético a nivel municipal en la Comarca de Utiel-Requena de 111,38 ktep.

9. DEMANDA POTENCIAL LOCAL				
Clases	1	2	3	Valor $\sum_j$
1	1	1/4	1/9	<b>0,063</b>
2	4	1	1/5	<b>0,194</b>
3	9	5	1	<b>0,743</b>

**Tabla 74. Matriz de comparación por pares: Demanda potencial local.**  
**Ratio de Consistencia: 0,07**

- 1- Demanda potencial baja referida al consumo, entre 0-20 ktep
- 2- Demanda potencial media referida al consumo, entre 20-40 ktep
- 3- Demanda potencial alta referida al consumo, mayor de 40 ktep



**Figura 77. Demanda Potencial local municipal (Ktep) y biomasa disponible municipal (t/año) de la Comarca de Utiel-Requena**



### 10. Población afectada

La población afectada se establecerá en función de la densidad de población a nivel municipal de la comarca, y de la distancia que separa la instalación de la zona urbana. Para esta última consideración se establecerán tres zonas que corresponderán a áreas de influencia previamente establecidas según:

- distancia del núcleo de población entre 0-1 kilómetro
- distancia del núcleo de población entre 1-3 kilómetros
- distancia del núcleo de población mayor que 3 kilómetros

Respecto a la población en los núcleos urbanos, está se ha calculado en función de la superficie de los polígonos que representan cada una de las zonas urbanas, tomando como referencia la población municipal conocida por el INE (Instituto Nacional de Estadística). Consecuentemente, se obtiene un mapa de distribución de la población a nivel comarcal, representando los siguientes rangos agrupados:

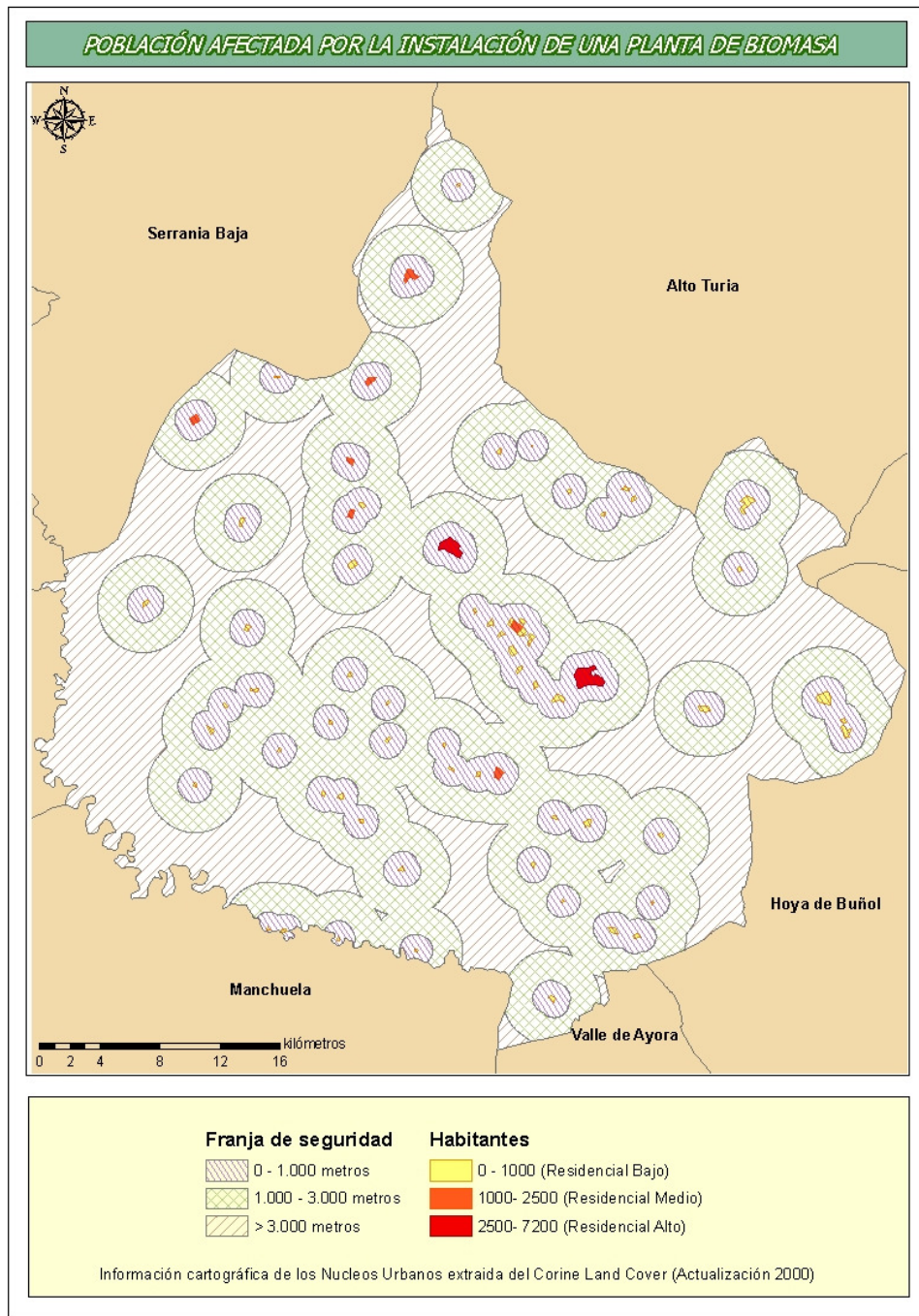
- Número de habitantes entre 0 y 1200 (Residencial Bajo)
- Número de habitantes entre 1200 y 3600 (Residencial Medio)
- Número de habitantes entre 3600 y 7200 (Residencial Alto)

Para integrar ambas informaciones en un único mapa resultante se suma la adecuación en función de la distancia que separa a la zona urbana y la adecuación en función de la densidad de población.

10. POBLACIÓN AFECTADA						
Clases	1	2	3	4	5	Valor <sub>ij</sub>
1	1	1/2	1/3		1/9	0,448
2	2	1	1/2		1/7	0,178
3	3	2	1		1/7	0,178
4	3	2	1	1	1/6	0,066
5	6	5	3		1	0,063

**Tabla 75. Matriz de comparación por pares: Población afectada.  
Ratio de Consistencia:**

1.-Población no afectada	Distancia mayores de 3 km Residencial Bajo
	Distancia mayores de 3 km Residencial Medio
	Distancia mayores de 3 km y Residencial Alto
2.- Población muy poco afectada	Distancia entre 1-3 km y Residencial Bajo
3.- Población poco afectada	Distancia entre 1-3 km y Residencial Medio
	Distancia entre 1-3 km y Residencial Alto
4.- Población afectada	Distancia entre 0 - 1 km y Residencial Bajo
	Distancia entre 0 - 1 km y Residencial Medio
5.- Población fuertemente afectada	Distancia entre 0 - 1 km y Residencial Alto



**Figura 78. Población afectada por la instalación de una planta de biomasa en la Comarca de Utiel-Requena**

### 11. Coste de transporte

El coste de transporte es uno de los aspectos logísticos más relevantes a considerar en cuanto a viabilidad económica de un proyecto a la hora de instalar una planta de biomasa. Tanto las labores de recogida de la biomasa agrícola y forestal procedentes de podas, como las de distribución de la biomasa en forma de pellets conllevan un elevado coste dentro de la inversión global de dicho proyecto, y por lo tanto, este factor se intenta minimizar a partir de la optimización de la logística empleando diferentes técnicas y metodologías como las expuestas en este trabajo.

Por este motivo, es relevante e imprescindible incluir el coste de transporte como un factor en el conjunto de la EMC que estamos llevando a cabo. Estos costes son conocidos como consecuencia de la metodología descrita en el apartado anterior para el proyecto BIODER.

11. COSTE DE TRANSPORTE: RECOGIDA Y DISTRIBUCIÓN					
Clases	1	2	3	4	Valor $_{ij}$
1	1	3	6	9	<b>0,591</b>
2	1/3	1	3	6	<b>0,257</b>
3	1/6	1/3	1	3	<b>0,105</b>
4	1/9	1/6	1/3	1	<b>0,047</b>

**Tabla 76. Matriz de comparación: Coste de transporte.  
Ratio de consistencia: 0,03**

- 1- Coste de transporte entre 19 – 23 euros/tonelada
- 2- Coste de transporte entre 23 – 26 euros/tonelada
- 3- Coste de transporte entre 26 – 29 euros/tonelada
- 4- Coste de transporte entre 29 – 34 euros/tonelada

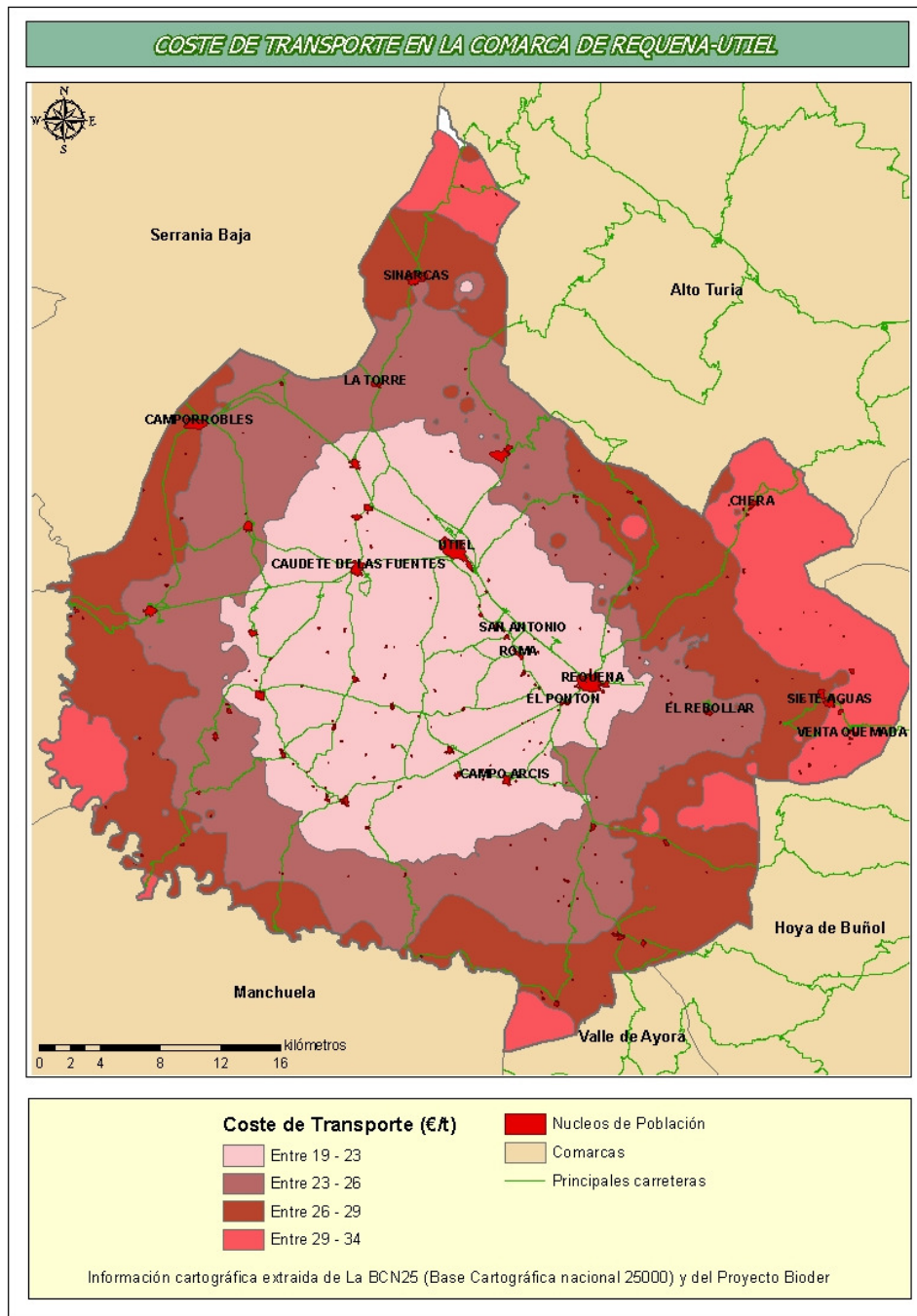


Figura 79. Coste de transporte (€/t) en la Comarca de Utiel-Requena

## 12. Geomorfología

La geomorfología también juega un papel importante para el proceso de localización de una instalación industrial. En concreto, se consideran varios factores que pueden afectar al proceso de puesta en marcha de dicha instalación, como son la susceptibilidad a la erosión, inundabilidad y estabilidad de taludes. A partir de las siguientes categorías se presenta la matriz de comparación por pares, donde no se incluyen las clases que limitan la actividad que corresponderían a medios activos (movimientos en masa, fallas, erosión actual elevada en surcos y cárcavas, inundaciones por largos periodos, transporte de materiales por efecto del oleaje, desbordamiento, y riesgo de deslizamientos y desprendimientos elevados).

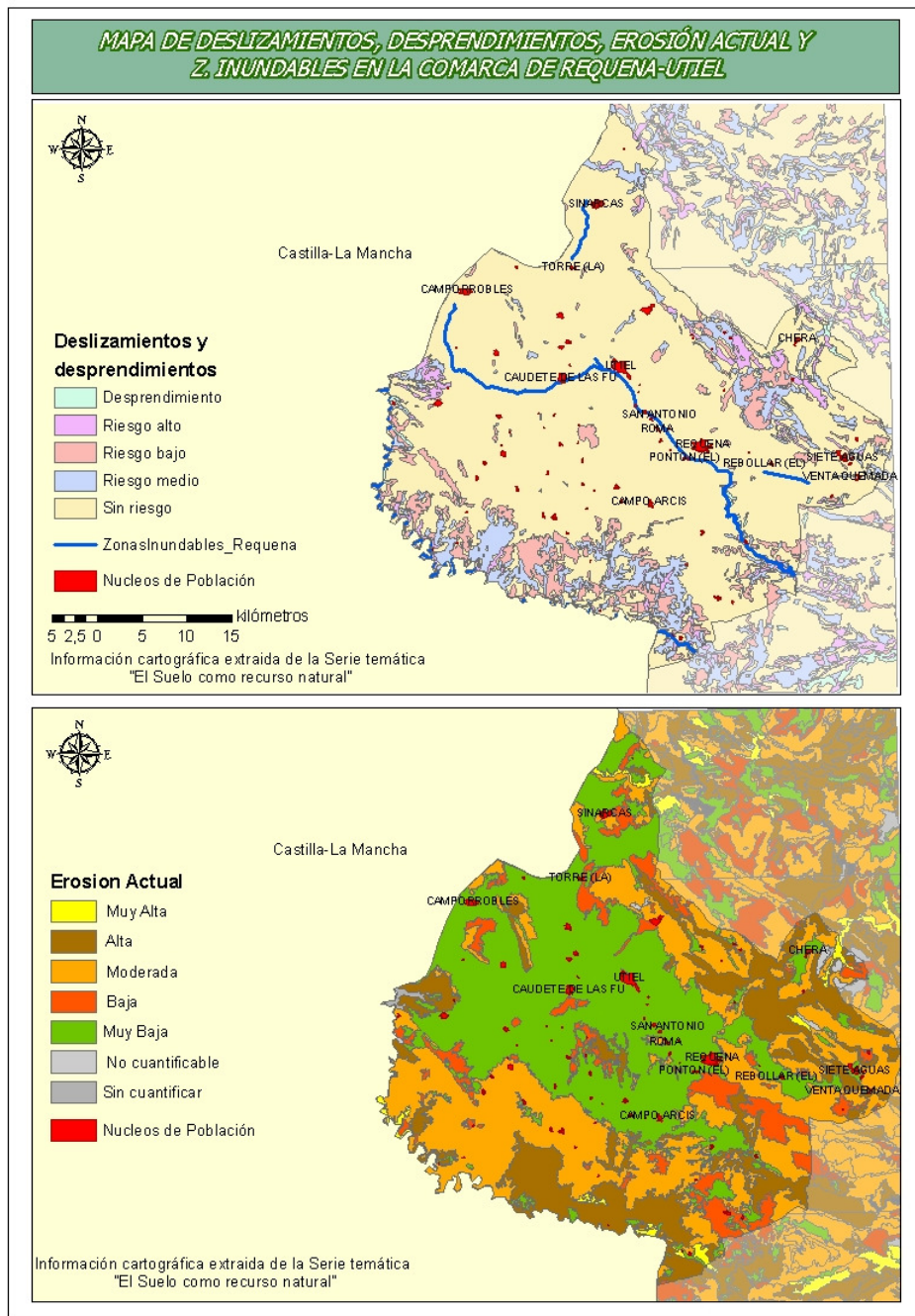
12. GEOMORFOLOGÍA							
Clases	1	2	3	4	5	6	Valor <sub>ij</sub>
1	1	2	4	1	2	5	<b>0,283</b>
2	1/2	1	3	2	2	1	<b>0,208</b>
3	1/4	1/3	1	1/4	1/3	1	<b>0,059</b>
4	1	1/2	4	1	2	4	<b>0,223</b>
5	1/2	1/2	3	1/2	1	4	<b>0,152</b>
6	1/5	1	1	1/4	1/4	1	<b>0,076</b>

**Tabla 77. Matriz de comparación por pares: Geomorfología.  
Ratio de Consistencia: 0,03**

Erosión Actual se clasifica en:	Riesgos de deslizamientos se clasifica en:
- <b>Muy baja</b>	- <b>Riesgo de deslizamiento bajo</b>
- <b>Baja</b>	- Riesgo de deslizamiento medio
- <b>Moderada</b>	- Riesgo de deslizamiento alto
- <b>Alta</b>	- Desprendimiento
- <b>Muy Alta</b>	- <b>Sin riesgo</b>

(Suelo como recurso natural y litología)

- 1-. Sin riesgo y erosión muy baja
- 2-. Sin riesgo y erosión baja
- 3-. Sin riesgo y erosión moderada
- 4-. Riesgo de deslizamiento bajo y erosión muy baja
- 5-. Riesgo de deslizamiento bajo y erosión baja
- 6-. Riesgo de deslizamiento bajo y erosión moderada



**Figura 80. Geomorfología en la Comarca de Utiel-Requena**

### 13. Impacto visual

Este tipo de instalaciones son una visión desagradable por la propia constitución mediante depósitos, estructuras metálicas, maquinaria, etc. Este es un factor claramente subjetivo, pero que hay que considerar como un rechazo por parte de la población. Resumiendo, es conveniente buscar ubicaciones para colocar estas instalaciones que resulte lo menos visible que sea posible. Además estas instalaciones producen efectos negativos de otros tipos como: ruidos, contaminación, levantamiento de polvo, etc., que se pueden reducir no situándolas dentro de la cuenca visual de las zonas cercanas a los núcleos de población, así como evitar el impacto paisajístico alejándolas de la zona visible de los elementos naturales como los lagos, ríos, y bosques.

Esta capa de Impacto visual se obtiene a partir del MDE de la zona de estudio donde se introducen los polígonos con las clases siguientes: lagos y embalses, vegetación natural (bosques) y núcleos de población. Las zonas susceptibles de ser impactadas visualmente por la instalación se obtienen a partir de un análisis de visibilidad introduciendo los elementos mencionados, al mismo tiempo que se determinan las zonas que no sufrirán dicho impacto. A partir de estos resultados puede establecerse la matriz de comparación para obtener la valoración de cada categoría, tal y como muestra la Tabla 78.

13. IMPACTO VISUAL			
Clases	1	2	Valor $ij$
1	1	6	<b>0,7</b>
2	1/6	1	<b>0,3</b>

**Tabla 78. Matriz de comparación por pares: Impacto visual.  
Ratio de Consistencia: 0,06**

- 1.- Visible
- 2.- No visible





---

**ANEXO IV**

**REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA DISTRIBUCIÓN  
DE LOS FACTORES EN LA EMC**

---



A continuación se muestra la distribución y los valores más significativos de cada factor. La tabla siguiente son las medias y desviación típica de cada uno de ellos.

CRITERIO	TIPO	DISTRIBUCION	$\mu$	$\sigma$
Pendiente	Continua	uniforme	0,20	0,17
Litología	Discreta	Discreta	0,10	0,12
Tipos de Cultivos	Discreta	Discreta	0,18	0,13
Cobertura Vegetal	Discreta	Discreta	0,24	0,15
Accesibilidad red vial	Discreta	Discreta	0,65	0,15
Fisiografía	Discreta	Discreta	0,12	0,11
Biomasa	Continua	Uniforme	0,23	0,19
Desarrollo económico	Discreta	Discreta	0,17	0,16
Demanda Potencial	Discreta	Discreta	0,13	0,19
Población afectada	Discreta	Discreta	0,24	0,14
Coste de transporte	Continua	Uniforme	0,77	0,08
Geomorfología	Discreta	Discreta	0,19	0,10
Impacto visual	Discreta	Discreta	0,57	0,18

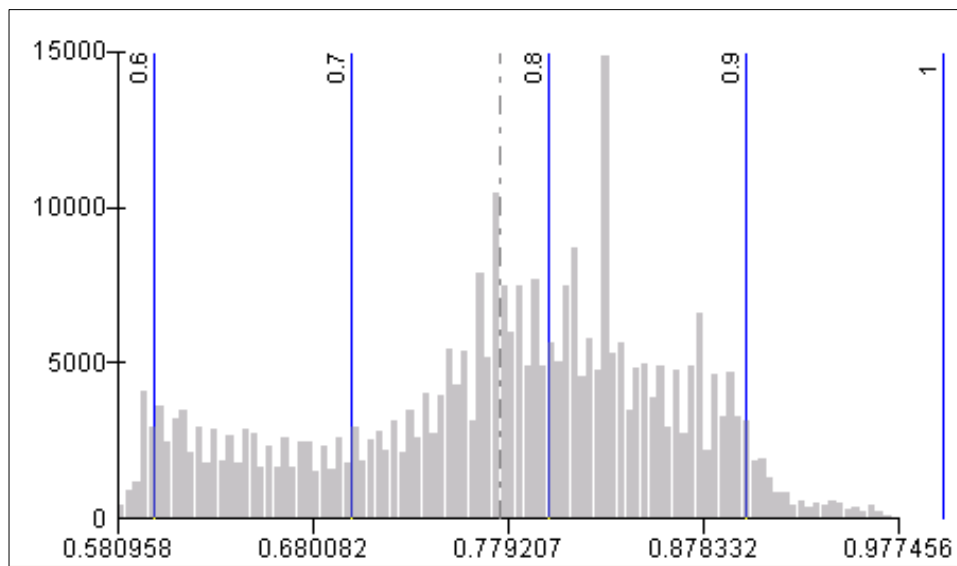


Figura 81. Coste de transporte. Distribución Uniforme

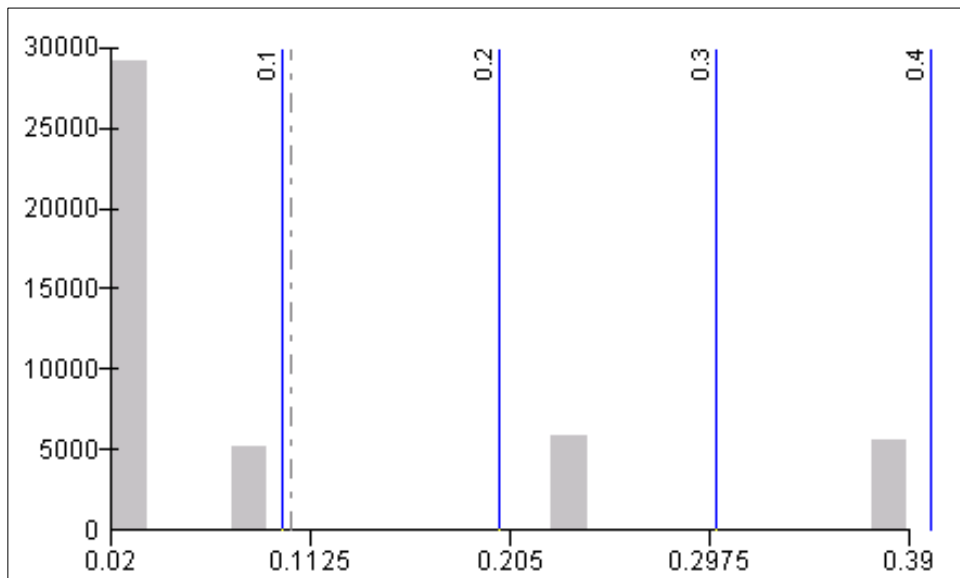


Figura 82. Litología. Distribución: discreta

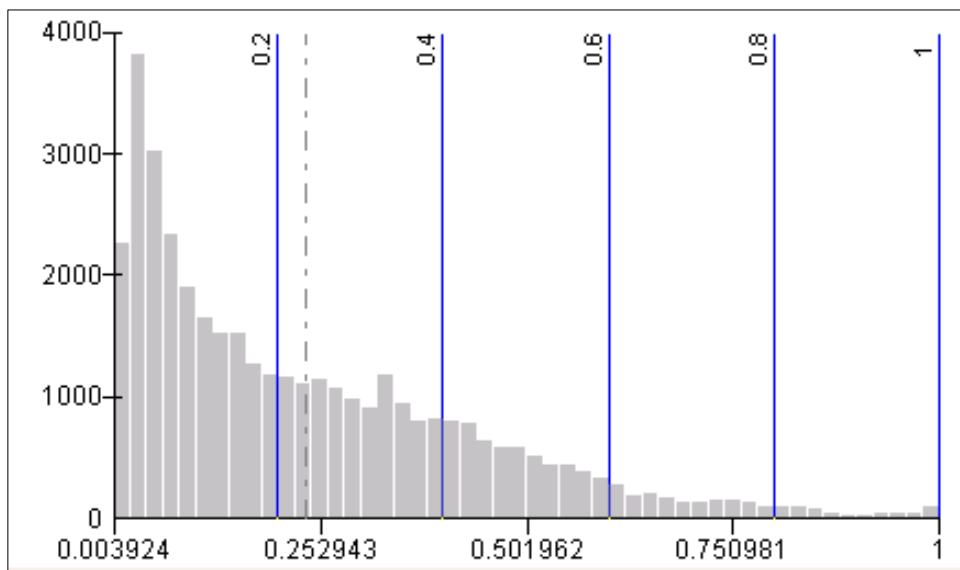


Figura 83. Biomasa. Distribución uniforme

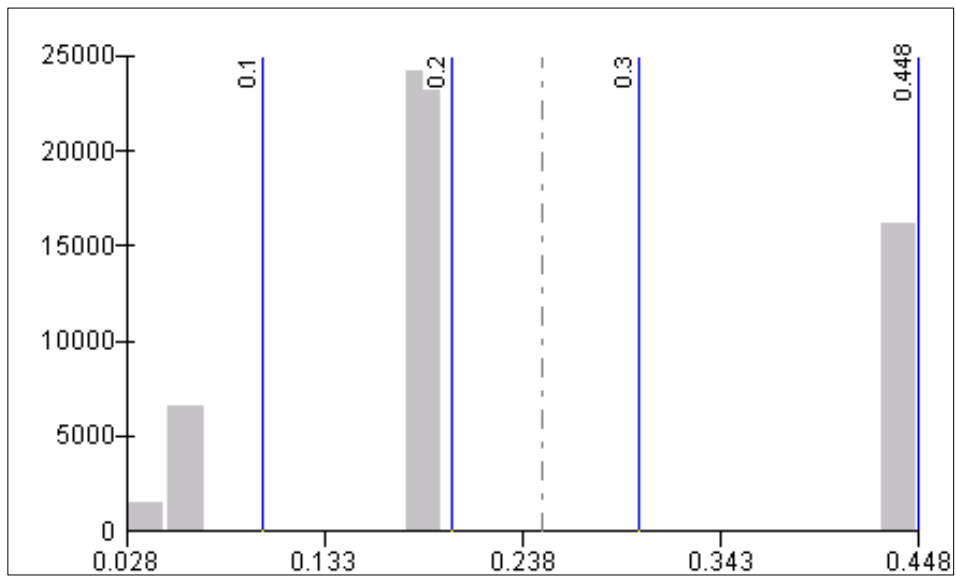


Figura 84. Población afectada. Distribución discreta

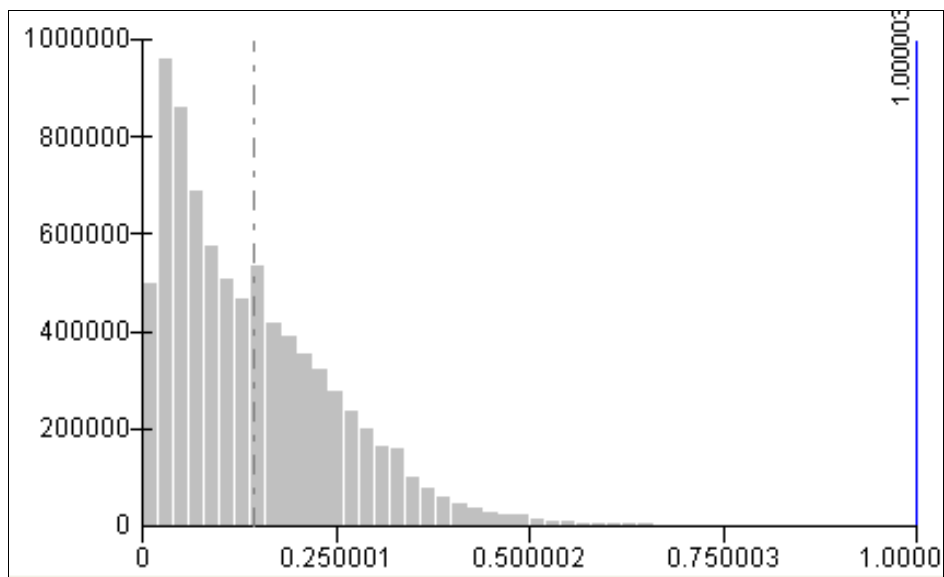


Figura 85. Pendiente del terreno. Distribución uniforme

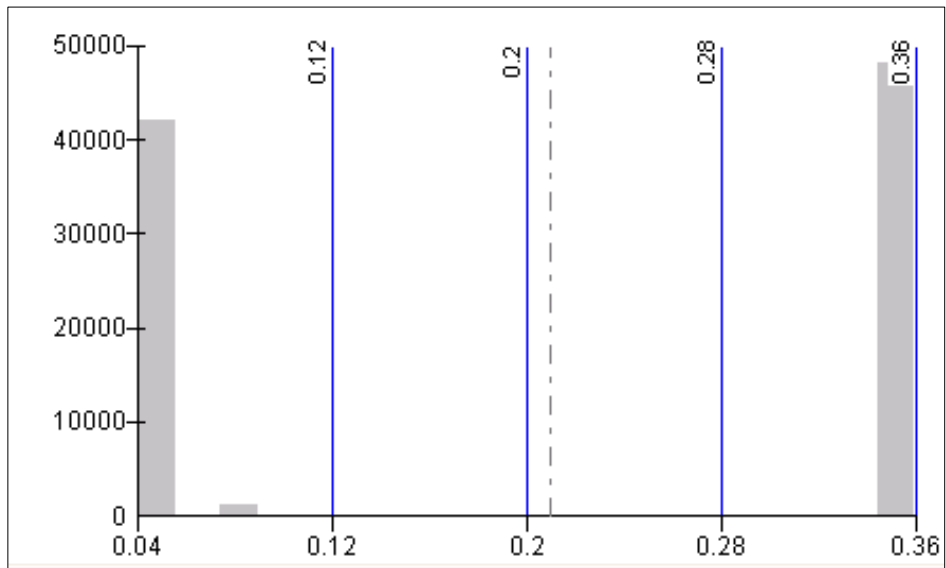


Figura 86. Cobertura vegetal natural. Distribución discreta

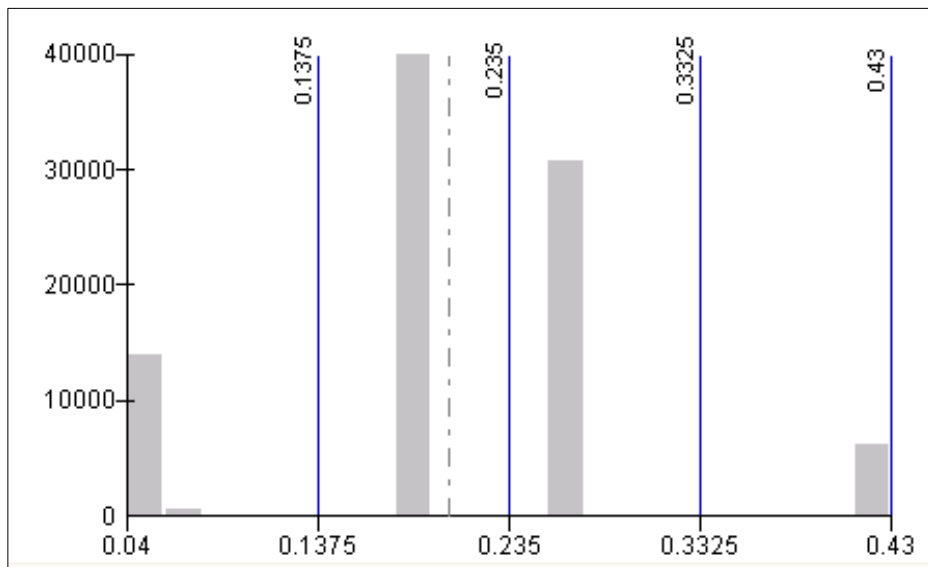


Figura 87. Tipos de cultivos. Distribución uniforme

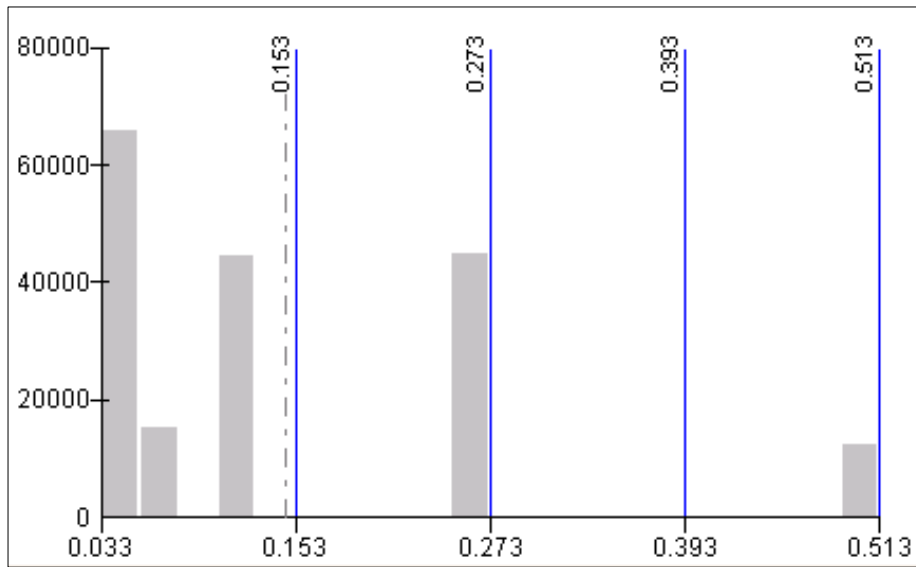


Figura 88. Fisiografía. Distribución discreta

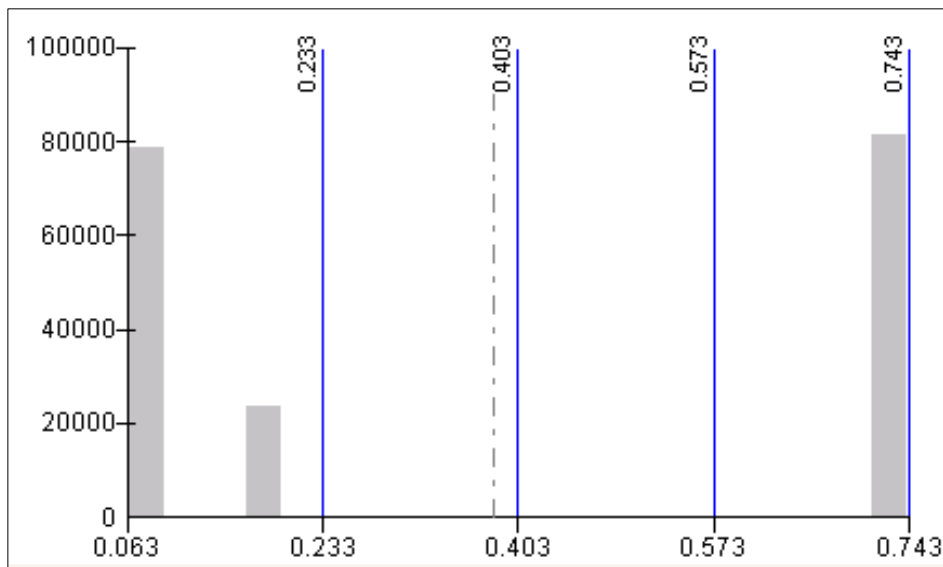


Figura 89. Demanda Potencial. Distribución discreta

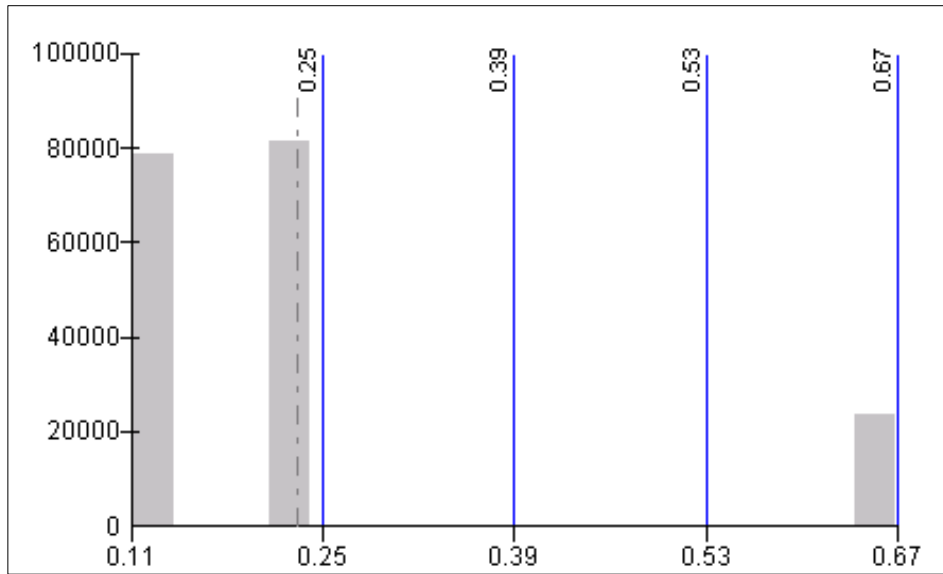


Figura 90. Desarrollo económico. Distribución discreta

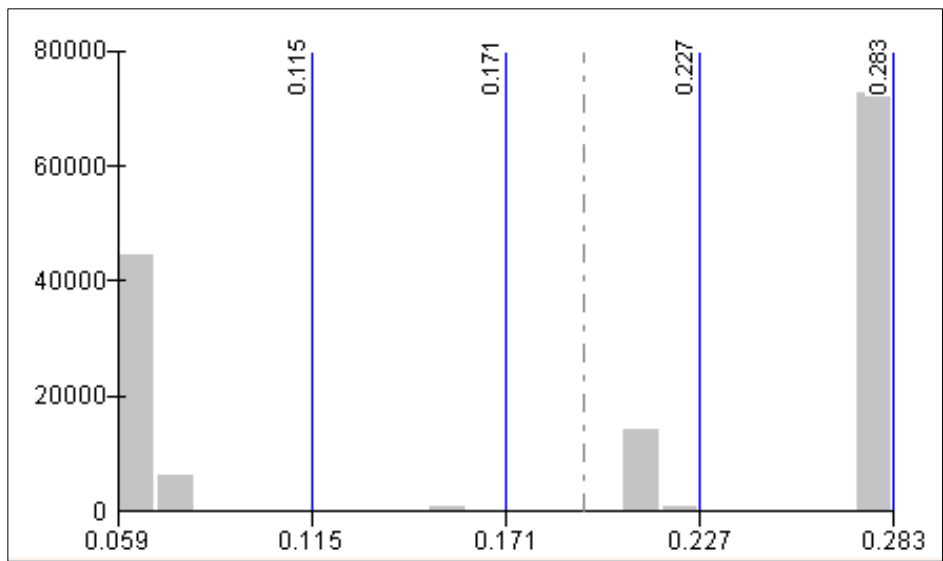


Figura 91. Geomorfología. Distribución discreta



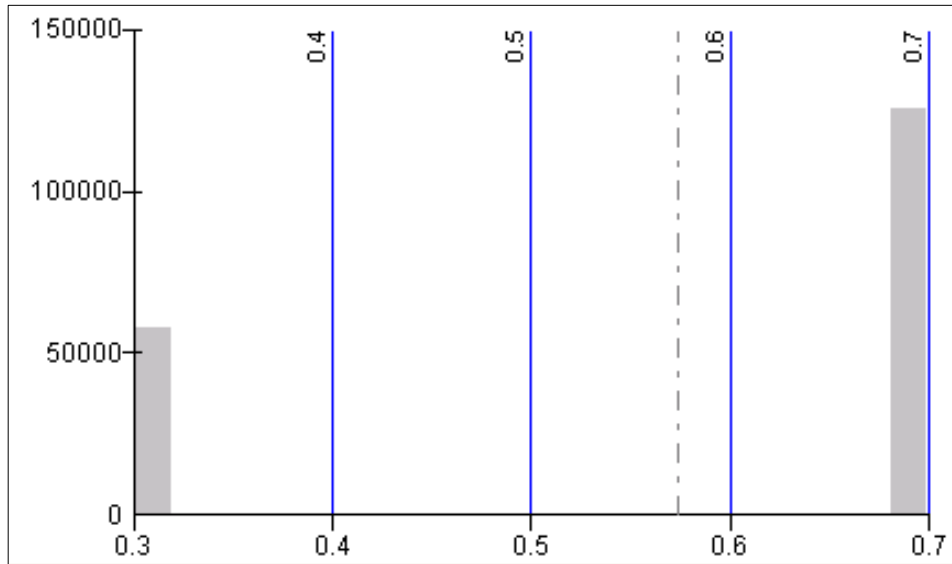


Figura 92. Impacto visual. Distribución discreta

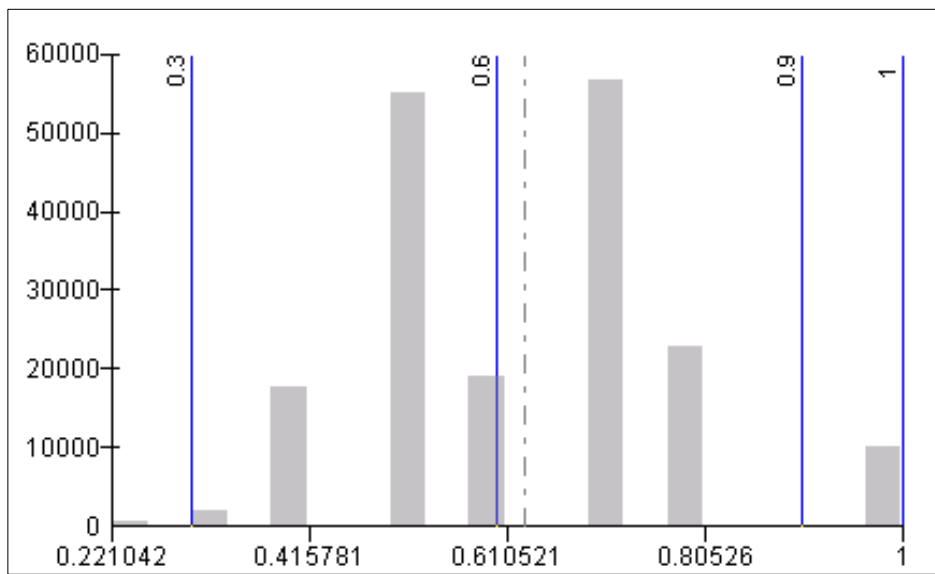


Figura 93. Accesibilidad a la red de transporte. Distribución discreta



---

**ANEXO V**

**INFORMACIÓN ADICIONAL A LA METODOLOGÍA A  
PARTIR DE LA APLICACIÓN DE MODELOS DE  
LOCALIZACIÓN**

---



La siguiente tabla muestra los resultados del estudio detallado en un km<sup>2</sup> cuyo procedimiento se ha explicado en el apartado 5.4.1.

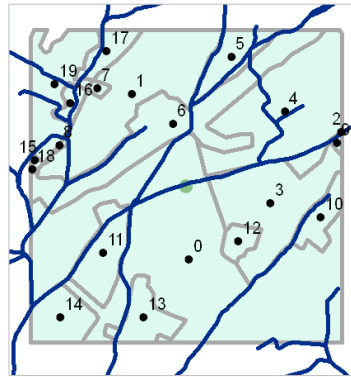


Figura 94. Ejemplo de las operaciones de recogida de biomasa a “pie de campo”

ID	DISTANCIA (Origen-Destino)	DISTANCIA PONDERADA	TONELADAS DE BIOMASA	TIPO DE CULTIVO
0	218	3.397,9	23,38	Almendo
1	1.470	7.742,0	7,9	Almendo/Olivo
2	590	1.180,0	0,28	Almendo/Olivo
3	418	1.058,9	3,8	Almendo/Olivo
4	-	0,0	0	Labor
5	-	0,0	0	Labor
6	516	1.032,0	0,9	Viñedo
7	1.416	2.832,0	0,4	Viñedo
8	1.210	2.420,0	0,11	Viñedo
9	564	1.128,0	0,16	Viñedo
10	1.732	3.464,0	1,79	Viñedo
11	384	898,6	3,51	Viñedo
12	371	742,0	0,98	Viñedo
13	567	1.134,0	2,55	Viñedo
14	642	1.284,0	2,8	Viñedo
15	1.359	2.718,0	0,8	Almendo/Olivo
16	1.381	2.762,0	0,6	Almendo/Olivo
17	1.559	3.118,0	0,4	Almendo/Olivo
18	1.151	2.302,0	0,56	Viñedo
19	1.475	4.621,7	4,7	Viñedo
<b>TOTAL</b>	14.327 m.	43.835 m.	55,62 t	

Tabla 79. Resultados en la gestión de la biomasa a “pie de campo” (Distancias en metros)



---

**ANEXO VI**

**PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DEL  
ANALISIS DE REDES EN ARCINFO WORSTATION**

---





AVI.1. CARACTERISTICAS DEL ANÁLISIS DE RED DE REQUENA:

- DEMANDA- PUNTOS DE BIOMASA: 1.760
- CENTROS- PUNTOS CANDIDATOS 462
- NODOS DE LA RED: 38.125

**Preparación y pre-tratamiento de la información inicial**

- 1) Seleccionar el espacio de trabajo. En nuestro caso de estudio el workspace es h:\requenapuntual
- 2) Generar la topología correspondiente: puntos, líneas y nodos
  - Introducir la información de la red de transporte y generar topología de nodos. Se genera la tabla NAT (Node Attribute Table).
  - Introducir la información de la demanda (biomasa) como cobertura de puntos y generar topología de puntos. Se crea la tabla PAT (Point Attribute Table)
  - Introducir la información de centros candidatos como cobertura de puntos y generar topología.

Attributes of centrosbio point												
FID	Shape	AREA	PERIMETER	CENTROS BIO#	CENTROS BIO-ID	FID 1	BIO TOTAL	BIO SINLAB	DEMAND	CANDIDATE	IMPEDANCE	SUPPLY
1	Point	0	0	1	1	0	43.252669	40.038169	4.003817	1	50000	1250
2	Point	0	0	2	2	1	35.950501	26.897001	2.6897	1	50000	1250
3	Point	0	0	3	3	2	1.858696	1.858696	0.18587	0	0	0
4	Point	0	0	4	4	3	16.139199	7.603799	0.76038	0	0	0
5	Point	0	0	5	5	4	35.403239	34.646639	3.464664	1	50000	1250
6	Point	0	0	6	6	5	36.259047	29.432047	2.943205	0	0	0
7	Point	0	0	7	7	6	0.699471	0.699471	0.069947	0	0	0
8	Point	0	0	8	8	7	9.8486	6.5032	0.65032	0	0	0

Esta tabla tiene 1.760 registros correspondientes a los puntos de aportación de biomasa tras haberse realizado una unión de tablas entre la PAT y la tabla que proporciona la biomasa en cada uno de ellos. También puede apreciarse el campo DEMAND.

**Crear topología de nodo: RED** es el nombre de la red de transporte que se va a emplear en el análisis. Se ha de generar la topología desde el menú "coverage topology", mediante los comandos CLEAN +BUILD (line), para construir intersecciones y después BUILD solamente con la opción NODE para generar la tabla NAT la cual es imprescindible en el modelo.

La tabla NAT tiene que tener un campo que corresponda a la demanda (biomasa), es decir, un DEMAND\_ITEM cuyos valores serán empleados cuando se ejecute el comando LOCATEALLOCATE. Además la tabla NAT ha de contener un campo denominado CANDIDATE” que tomará los siguientes valores:

- Valor = 1 si la ubicación es lugar candidato móvil
- Valor = 2 si la ubicación es lugar candidato fijo
- Valor = 0 si no es lugar candidato

- 3) Asignar los puntos candidatos y los puntos de demanda a la tabla NAT mediante la opción analysis-> overlay-> point-node. Esa operación implica que tanto los puntos origen (biomasa) como los destinos (lugares candidatos) se trasladan al más cercano de la red debido a que es una exigencia para el análisis. Posteriormente se deberá realizar una unión de tablas para que la tabla NAT contenga los campos CANDIDATE, DEMAND y SUPPLY.

FID	Shape	ARC#	RED#	RED-ID	FID_1	BIO TOTAL	BIO SINLAB	DEMAND	CANDIDATE	IMPEDANCE	SUPPLY
4446	Point	5097	4446	4446	0	0	0	0	0	0	0
4447	Point	5197	4447	4447	0	0	0	0	0	0	0
4448	Point	5098	4448	1740	1739	44.495871	44.253971	4.425397	0	0	0
4449	Point	5176	4449	4449	0	0	0	0	0	0	0
4450	Point	5099	4450	4450	0	0	0	0	0	0	0
4451	Point	5100	4451	4451	0	0	0	0	0	0	0

- 4) Generación del archivo .cen a partir de la cobertura de puntos correspondiente a los centros candidatos. El campo CANDIDATE debe contener los valores mencionados según el tipo de candidato (0,1 ó 2) y en su caso el suministro de cada uno de ellos. Para generar el archivo de los puntos candidatos:

```
Usage: INFOFILE <cover> <feature_class> <output_info_file> <item...item>
<APPEND ! INIT>
Arcplot: infofile h:\requenapuntual\matriz\red462\red point
h:\requenapuntual\matriz\matriz462.cen
```

### Procedimiento para el análisis de redes

- 1) Crear la cobertura de red, es decir, la NETCOVER que va asociada a la tabla NAT, a la cobertura de centros candidatos (archivo .cen creado anteriormente) que se generará posteriormente. Esta netcover ha sido nombrada como REDES. Además se indica cual es el campo desde el cual se va a leer la demanda, denominado “demand”, a través del comando DEMAND. Posteriormente, se introduce la impedancia (por defecto la longitud).

```
Arcplot: netcover h:\requenapuntual\red REDES
Arcplot: demand # demand
Arcplot: impedance length length
Arcplot: locatecandidates h:\requenapuntual\centrosbio point demand candidate supply
Arcplot: show locatecandidates
POINT,H:\REQUENAPUNTUAL\CENTROSBIO,DEMAND,CANDIDATE,SUPPLY
Arcplot: locatecriteria mindistance
```

Estos son los parámetros que solicita el comando LOCATECANDIDATES una vez generado el fichero de puntos candidatos mediante el comando INFOFILE

```
Usage: LOCATECANDIDATES <cover> <POINT | POLY> <demand_item> <candidate_item>
<supply_item>
```

Veamos un ejemplo de cada modelo que se ha resuelto: mindistance (p-mediano), maxcover (máxima cobertura) y la matriz O-D. Para resolver estos modelos los

principales comandos una vez preparados los datos iniciales son: LOCATECRITERIA para establecer el criterio de localización y LOCATEALLOCATE para ejecutar el modelo y obtener los archivos de los resultados.

**AVI.2. PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN A PARTIR DEL P-MEDIANO (MINIMA DISTANCIA)**

Siguendo el procedimiento descrito y una vez los datos iniciales están listos para ser empleados en el análisis de redes, unicamente debemos seguir la consecución de pasos que se muestra a continuación.

PRIMER OPTIMO=881

```
Arcplot: netcover h:\requenapuntual\red REDES
Arcplot: demand # demand
Arcplot: impedance length length
Arcplot: locatecandidates h:\requenapuntual\centrosbio point demand
pply
Arcplot: show locatecandidates
POINT,H:\REQUENAPUNTUAL\CENTROSBIO,DEMAND,CANDIDATE,SUPPLY
Arcplot: locatecriteria mindistance
```

```
Arcplot: locateallocate allocpunt1 centerpunt1 globpunt1 1 gria
Using distances from memory
Solving ...
In Global section
In Regional section

The 1 required site is:
Mobile site 881
The total weighted distance travelled is 141722312.538
Arcplot: list centerpunt1
1
CENTROSBIO-ID = 881
CENTROSBIO# = 881
TOTFEATURES = 1760
TOTDEMAND = 10074.547
TOTDIST = 29173934.000
TOTWDIST = *****
AUGDIST = 16576.100
AUGWDIST = 14067.363
FURTHDIST = 35000.000
FURTHEST = 1760
ALL_TOTDIST = 29173934.000
ALL_AUGDIST = 16576.100
ALT_DEMAND = 0.000
ALT_TOTWDIST = 0.000
SUPPLY = 1250.000
```

Podemos observar los resultados que se obtienen listando cada uno de los ficheros de salida. El primer fichero “allocpunt1” muestra los resultados de todos los puntos destinos con los orígenes. El segundo archivo “centerpunt1” muestra los principales valores del centro óptimo como son: demanda total, distancia total, distancia total ponderada, distancia media, distancia media ponderada, distancia más alejada del óptimo, y si se introduce, el suministro. Por ultimo, el fichero “globpunt1” muestra un resumen del análisis. Estos ficheros son nombrados por el usuario. Para visualizarlos se utiliza el comando LIST.

Veamos como se ha llevado a cabo la estrategia en la cual se establecen centros de transferencia. El siguiente ejemplo para dos centros de transferencia muestra el

procedimiento donde ahora los dos centros de transferencia son los orígenes de la biomasa, y tenemos 460 lugares candidatos de los cuales elegiremos el óptimo para ubicar la planta y trasladar toda la biomasa allí.

PUNTO ÓPTIMO=232

```

not a valid subclass name
Arcplot: netcover h:\requenapuntual\red CT2
Arcplot: demand # demand
Arcplot: impedance length length
Arcplot: locatecandidates h:\requenapuntual\ct2\ct2_cen point demand candidate s
apply
Arcplot: locatecriteria mindistance
Arcplot: locateallocate allocct2 centerct2 globct2 1 gria
LA env changed, discarding old strings
Computing distances between 2 demand and 460 candidate locations
Solving ...
  In Global section
  In Regional section

The 1 required site is:
  Mobile site 232
The total weighted distance travelled is 48281352.301
Arcplot: list centerct2
  1

CT2_CEN-ID          = 232
CT2_CEN#           = 232
TOTFEATURES        = 2
TOTDEMAND           = 5596.694
TOTDIST            = 18691.807
TOTWDIST           = 48281352.000
AUGDIST            = 9345.903
AUGWDIST           = 8626.763
FURTHDIST         = 17691.807
FURTHEST           = 57
ALL_TOTDIST        = 18691.807
ALL_AUGDIST        = 9345.903
ALT_DEMAND         = 0.000
ALT_TOTWDIST       = 0.000
SUPPLY             = 1250.000
Arcplot:

```

### AVI.3. PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN DE MÁXIMA COBERTURA

#### Ejemplo del modelo de Máxima cobertura con limitación de la distancia a 30km y una única planta

El procedimiento es el mismo que el descrito en el caso del p-mediano únicamente cambia el criterio de localización, siendo en este caso el de máxima cobertura. Para ello el comando que empleamos es el MAXCOVER

PRIMER OPTIMO=1039

```

Arcplot: netcover h:\requenapuntual\red REDES
Arcplot: demand # demand
Arcplot: impedance length length
Arcplot: locatecandidates h:\requenapuntual\centrosbio point demand
candidate supply
Arcplot: locatecriteria maxcover 30000
Arcplot: locateallocate alloc_max30000 center_max30000 glob_max30000 1
teitzbart
Using distances from memory
Solving ...
Iteration 1

```

The 1 required site is:

Mobile site 1039

The total weighted distance travelled is 140598378.211

30 locations with 54.851 demand are outside LOCATECRITERIA's maximum distance.

Arcplot: list center\_max30000

CENTROSBIO-ID = 1039  
CENTROSBIO# = 1039  
TOTFEATURES = 1730  
TOTDEMAND = 10019.696  
TOTDIST = 28558626.000  
TOTWDIST = 140598378.211  
AVGDIST = 16507.877  
AVGWDIST = 14032.199  
FURTHDIST = 29832.867  
FURTHEST = 690  
ALL\_TOTDIST = 29485954.000  
ALL\_AVGDIST = 16753.383  
ALT\_DEMAND = 0.000  
ALT\_TOTWDIST = 0.000  
SUPPLY = 1250.000

Arcplot: list glob\_max30000

RECNUM = 1  
DATE = 4/08/2011 3:49 PM  
COVER = H:\REQUENAPUNTUAL\CENTROSBIO  
FEATURE\_TYPE = POINT  
OUT\_ALLOC\_FILE = alloc\_max30000  
OUT\_CENTERS\_FILE = center\_max30000  
NUM\_CENTERS = 1  
CRITERIA = MAXCOVER  
MAX\_DIST = 30000.000  
DES\_DIST = -1.000  
DIST\_DECAY = 0.000  
DIST\_EXPON = 0.000  
TOTDIST = 28558626.000  
AVGDIST = 16507.877  
TOTAL\_WGHDIST = 140598378.211  
TOTDEMAND = 10019.696  
ALT\_DEMAND = 0.000  
UNASSIGNED = 30  
UNASSIGNED\_DEMAN = 54.851  
FURTHEST = 690  
FURTHDIST = 29832.867

**AVI.4. MATRIZ DE ORIGEN DESTINOS**

- En Primer lugar hay que preparar los centros candidatos en un archivo .cen, que en nuestro caso son 462 candidatos y que se encuentran en h:\requenapuntual\matriz\red462\red y se renombra mediante INFOFILE para convertirlo en un archivo .cen, llamado matriz462.cen.
- En segundo lugar se establece la red, como siempre mediante el comando NETCOVER h:\requenapuntual\redcompleta\red
- Se ejecuta el comando de la matriz O-D, NODEDISTANCE tal y como se observa en la imagen
- Se nombra el fichero de salida: matrizdistance.txt con una restricción en distancia de 50km y la longitud debe ser medida a través de la red (network)
- El resultado es la distancia entre cada uno de los lugares candidatos y los nodos de la red, pero sin ponderar distancias, es decir, sin tener en cuenta la demanda
- Numero de combinaciones totales :  $462 * 1742 = 763.350$  combinaciones

```
Warning: Floating ArcStorm already timed out.
Copyright (C) 1982-2006 Environmental Systems Research Institute, Inc.
All rights reserved.
ARCPLLOT 9.2 (Sun Sep 17 16:05:34 PDT 2006)

Arcplot: infofile
Character string expected.
Usage: INFOFILE <cover> <feature_class> <output_info_file> <item...item>
      <APPEND ! INIT>
Usage: INFOFILE <info_file> INFO <output_info_file> <item...item> <APPEND ! INIT>
Arcplot: infofile h:\requenapuntual\matriz\red462\red point h:\requenapuntual\matr
Arcplot: netcover clear
Destroying any saved internal network
Arcplot: netcover h:\requenapuntual\redcompleta\red REDES
Arcplot: centers h:\requenapuntual\matriz\matriz462.cen
Arcplot: impedance length length
Arcplot: nodedistance centers nodes matrizdistance.txt 50000 network
Building network...
Calculating distances...
Arcplot:
```

Utilizando centros (candidatos destinos)= 462 y stops (origenes de biomasa)=1.742

```
Arcplot: netcover h:\requenapuntual\redcompleta\red REDES
Arcplot: centers h:\requenapuntual\matriz\matriz462.cen
Arcplot: stops h:\requenapuntual\matriz\stop1760.stp
Arcplot: impedance length length
Arcplot: nodedistance centers stops matriz_cent_stop.txt 50000 network
No network in memory
Building network...
Calculating distances...
Arcplot:
```

