

ESQUEMA METODOLÓGICO PARA LA TOMA DE DECISIONES SOBRE EL USO SOSTENIBLE DEL SUELO: APLICACIÓN A LA LOCALIZACIÓN DE SUELO INDUSTRIAL

MARÍA TERESA LAMELAS GRACIA

Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza
C/ Pedro Cerbuna 12, 50009, Zaragoza, España
tlamelas@unizar.es

RESUMEN

El principal objetivo de este estudio es el desarrollo de un esquema metodológico que facilite la evaluación de los georriesgos y georrecurso y la toma de decisiones sobre diferentes formas de uso del suelo, teniendo en cuenta estos aspectos geocientíficos, en un medio semiárido como es la Depresión del Ebro, en el entorno de Zaragoza. El desarrollo de tecnologías, en especial SIG, y su aplicación en la evaluación de tierras permitirá el desarrollo de modelos y cartografías precisas de georrecurso y georriesgos en el entorno de Zaragoza, a escala regional. Así mismo, el uso de SDSS (Spatial Decision Support Systems) permitirá realizar, con posterioridad, un análisis de la capacidad del terreno para acoger determinados usos del suelo, que puede ayudar a la localización óptima de los mismos, teniendo en cuenta aspectos geocientíficos.

Palabras clave: Depresión del Ebro, SDSS, SIG, Análisis multicriterio, Manejo sostenible del suelo, Suelo Industrial.

METHODOLOGICAL WORKFLOW TO SUPPORT SUSTAINABLE LAND-USE DECISION MAKING: APPLICATION TO INDUSTRIAL LAND USE LOCATION

ABSTRACT

The main objective of this study is the development of a methodological workflow, to facilitate the geo-hazards and geo-resources assessment and the decision-making of different land-use forms under these geoscientific aspects in a semiarid environment as the Ebro Basin, in the surroundings of Zaragoza. The development of technologies and especially Geographical Information Systems and their application to land evaluation modelling will make it possible to develop accurate geo-hazard and geo-resource mapping for the Zaragoza periphery on a regional scale. Moreover, the application of Spatial Decision Support Systems will allow for the

performance of subsequent land-use suitability analysis, which will help in the proper location of diverse land use systems with regards to geoscientific aspects.

Keywords: Ebro basin, SDSS, GIS, multicriteria analysis, sustainable land-use management, industrial land use.

1. Introducción

Uno de los importantes desafíos del siglo XXI es conseguir el desarrollo sostenible en las grandes ciudades. No obstante, la relación entre el desarrollo económico y la sostenibilidad ambiental es compleja. Por ejemplo, en la periferia de Zaragoza, debido al rápido desarrollo urbano sufrido en las últimas décadas, las interacciones con la geosfera han sido, en su mayoría, ignoradas. La consecuencia ha sido la destrucción de muchas infraestructuras (a causa de la subsidencia del terreno), el mal uso del suelo agrícola, la destrucción de diversos espacios naturales de gran valor medio ambiental y una creciente contaminación del acuífero, entre otros.

Con anterioridad a la declaración de Río de Naciones Unidas en 1992 (<http://www.un.org>) y a la Agenda 21 y su programa adicional de implementación, en la mayor parte de la bibliografía científica sobre desarrollo sostenible no se mencionaban las ciudades. Esta reticencia a discutir sobre desarrollo sostenible en ciudades puede haber existido, probablemente, porque muchos de los que han escrito sobre asuntos ambientales han considerado a las ciudades con desdén, incluso aunque vivan en ellas. Esto ha derivado en una bibliografía científica más bien escasa sobre desarrollo sostenible en ciudades, en los años setenta y ochenta (McGranahan y Satterthwaite, 2003; Mitlin y Satterthwaite, 1996).

Con posterioridad a la Declaración de Río, que reafirmó la Declaración de la Conferencia de Naciones Unidas en Ambiente Humano adoptada en Estocolmo el 16 de junio de 1972, la promoción de un desarrollo sostenible en los establecimientos humanos ha suscitado una creciente preocupación. En los años noventa, varias conferencias internacionales fueron organizadas abordando el asunto de la urbanización rápida, su desarrollo y administración, y el término Megaciudad fue ampliamente difundido. De hecho, la Agenda 21 sugiere que cada administración local debe entrar en un diálogo con sus ciudadanos, las organizaciones y las empresas privadas locales, y adoptar una "Agenda local 21" para su propia comunidad.

En la Estrategia Temática para el Medio Ambiente Urbano de la Unión Europea se recalca el importante papel de las zonas urbanas en el cumplimiento de los objetivos de la Estrategia de la Unión Europea para un desarrollo sostenible ya que es en las ciudades donde se concentran muchos problemas medioambientales, pero también son el principal motor económico. Además, entre las medidas que plantea se encuentra la planificación sostenible (utilización adecuada del suelo) que contribuya a reducir la expansión incontrolada y la pérdida de hábitats naturales y de la diversidad biológica.

La Comisión del Mundo para el Medio Ambiente y el Desarrollo (WCED, 1987) definió el desarrollo sostenible como "el desarrollo que satisface las necesidades de las generaciones presentes

sin comprometer la habilidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades" (citado por Pugh, 1996; Gilpin, 2000; McGranahan y Satterthwaite, 2003).

En los enfoques posteriores, es decir Munasinghe (1993) y Munasinghe y Cruz (1995), se distingue entre sostenibilidad "económica", "social" y "medio ambiental" ([figura 1](#)). Así, por sostenibilidad económica se entiende la generación de un flujo máximo de bienestar económico mientras se mantienen los recursos medio ambientales; la sostenibilidad social está orientada a las personas, se identifica con la estabilidad y la diversidad cultural de los sistemas sociales; y la sostenibilidad ambiental se refiere a la conservación, la resiliencia y la adaptación de los sistemas físicos y biológicos (Pugh, 1996; Gilpin, 2000). Una definición adecuada de lo que implica el desarrollo sostenible en los núcleos urbanos se puede encontrar en McGranahan y Satterthwaite (2003). Incluye, además de las necesidades económicas, ambientales y sociales, las necesidades políticas que implica la libertad de tomar parte en la política nacional y local y en decisiones con respecto a la administración y el desarrollo.

El quinto principio de la Agenda 21 (<http://www.un.org/esa/sustdev/>) sugiere que todos los Estados y todas las personas deberían cooperar en la tarea esencial de erradicar la pobreza como un requisito imprescindible para el desarrollo sostenible. El objetivo sería disminuir las disparidades en el nivel de vida y satisfacer mejor las necesidades de la mayoría de las personas del mundo. Esto implica, no sólo un desarrollo sostenible inter-generacional, sino también intra-generacional. Véase [figura 1](#).

Según la Agenda 21, en áreas urbanas de rápido crecimiento, el acceso a la tierra es cada vez más difícil debido a la demanda de la misma por parte de la industria, la construcción urbana, el comercio, la agricultura, las infraestructuras y la necesidad de espacios abiertos. Además, en muchos países, el uso de la tierra en grandes áreas urbanas en expansión es un problema grave, especialmente porque los recursos que son esenciales para este rápido crecimiento son sellados. Entre estos recursos se encuentran el agua subterránea, los suelos óptimos para uso agrícola y los depósitos minerales con materias primas (arenas, gravas, calizas). Como resultado, en muchas áreas, es difícil acceder al agua potable y grandes cantidades de materiales para la construcción tienen que ser transportados a grandes distancias (Hoppe *et al.*, 2006).

Del mismo modo, la alta densidad de población, aumenta la posibilidad de que los fenómenos naturales peligrosos (terremotos y tsunamis, transportes en masa en pendientes escarpadas o erosión de evaporitas en el subsuelo, así como volcanismo) puedan convertirse en riesgos y llevar, finalmente, a la producción de catástrofes (Hoppe, 2002; Hoppe *et al.*, 2006; Plate y Merz, 2001; Wellmer y Becker-Plate, 1999, 2002).

De acuerdo con la Agenda 21, en las últimas dos décadas, se estima que los desastres naturales han causado unos 3 millones de muertes y afectado a 800 millones de personas. Las pérdidas económicas globales se estiman, por parte de la Oficina Coordinadora de la Ayuda a los Desastres de Naciones Unidas, que han sido del orden de 30-50 mil millones de dólares por año.

La Agenda 21 sugiere que: "Todos los países deberían considerar apropiado llevar a cabo un inventario nacional completo de sus recursos, para establecer un sistema de información del

Lamelas Gracia, M. T. (2009): "Esquema metodológico para la toma de decisiones sobre el uso sostenible del suelo: Aplicación a la localización de suelo industrial", *GeoFocus (Artículos)*, nº 9, p. 28-66. ISSN: 1578-5157

territorio en el que los recursos se clasificarían según sus usos más apropiados, y se identificarían áreas ambientalmente frágiles o propicias para la producción de desastres para tomar las correspondientes medidas especiales de protección. El objetivo general debería ser mejorar o cambiar la organización en el proceso de toma de decisiones, para que la consideración de asuntos socioeconómicos y medio ambientales se pueda integrar completamente en el mismo y se asegure la participación pública".

La Estrategia Española de Desarrollo Sostenible (EEDS) que se enmarca dentro de la Estrategia de Desarrollo Sostenible de la UE (EDS), renovada en el Consejo de Bruselas de 2006, fomenta también un enfoque integrador de la dimensión económica, social, ambiental y global de la sostenibilidad del desarrollo con los objetivos de: garantizar la prosperidad económica, asegurar la protección del medio ambiente, evitar la degradación del capital natural, fomentar una mayor cohesión social teniendo en cuenta las tendencias demográficas actuales y contribuir solidariamente al desarrollo de los países menos favorecidos en aras de la sostenibilidad global.

Sin embargo, aunque las decisiones en el uso del suelo se hacen generalmente teniendo en cuenta diversidad de criterios (económico, ecológico y social), los aspectos geocientíficos no son, con frecuencia, considerados, o bien son considerados como criterios de menor importancia (Hoppe *et al.*, 2006). No obstante, las áreas que contienen georrecursos, o suponen un georriesgo, no pueden ser modificadas por el hombre, ya que los georrecursos y georriesgos tienen, generalmente, ciclos más largos de regeneración que la vida humana y pueden afectar los intereses de varias generaciones. Como resultado, toda utilización del territorio que se planee -especialmente en comunidades en crecimiento- debe prestar atención a los geo-potenciales, que incluye a todos los georrecursos y georriesgos pertinentes (Hoppe *et al.*, 2006).

Para cumplir las funciones de Ordenación del Territorio, los instrumentos a utilizar deben ser actualizables, multi-escalares y deben contener una amplia gama de informaciones relativas al medio ambiente; es decir, al medio físico, medio biótico, aspectos antrópicos y sus interrelaciones. Desde este punto de vista, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son enormemente necesarios (Amadio *et al.*, 2002).

La organización del medio ambiente fue un motivador principal en el desarrollo de los SIG, y un área de aplicación mayor de los mismos, a lo largo de su historia. El primer SIG, el Sistema de Información Geográfica de Canadá, se desarrolló a mitad de la década de los 60 para proporcionar al Gobierno de Canadá una localización de sus recursos, su utilización y su administración (Bosque, 1997; Goodchild, 2003). Además, las nuevas tecnologías, en particular la Teledetección y los Sistemas de Información Geográfica, han supuesto un gran impacto en los estudios de riesgos (Chester, 2002).

Así mismo, en los últimos años, el desarrollo de Sistemas de Ayuda a la Decisión Espacial (Spatial Decision Support System, SDSS) ha supuesto una ayuda considerable en los esfuerzos por resolver conflictos, entre los diferentes usos del suelo, que aparecen comúnmente en el proceso de ordenación sostenible del territorio.

Es a partir aproximadamente del año 1991 (Gómez-Delgado y Barredo, 2005), en la denominada cuarta etapa de evolución en los SIG, cuando se desarrollan los análisis de decisión, encontrándose los encargados de la gestión de estos sistemas ciertas carencias analíticas que presentaban estos sistemas, con lo cual era frecuente la integración de técnicas y programas compatibles con los SIG para de algún modo poder utilizar a plenitud su potencial en cuanto a rapidez, volumen y procesamiento de datos espaciales. Los trabajos de Voogd (1983), Janssen y Rietveld (1990), Carver (1991), Can (1993), Pereira y Duckstein (1993), Barredo y Bosque (1995), Bosque *et al.* (1999), Thill (1999), Eastman *et al.*, (1993), entre mucho otros, indican la tendencia de integración de técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC) y SIG, tratando de solventar de algún modo las carencias analíticas de los SIG (Gómez-Delgado y Barredo, 2005).

Según Jankowski (1995), se siguen dos tipos de estrategias para intentar paliar estas deficiencias: a) resolver este tipo de problemas a través de los Sistemas de Ayuda a la Decisión Espacial (SDSS, Spatial Decision Support System) o b) recurriendo a la integración de los SIG y determinados módulos analíticos especializados.

Los SDSS combinan, por tanto, los beneficios de los SIG y las metodologías de apoyo a la toma de decisiones (técnicas de EMC) y son, por este motivo, convenientes para apoyar el desarrollo sostenible de las zonas urbanas por medio del análisis de la capacidad del terreno para acoger un determinado uso del suelo.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, el entorno de la ciudad de Zaragoza, un gran núcleo urbano actualmente en desarrollo, está reclamando una investigación más exhaustiva acerca de aspectos geocientíficos, como es la regionalización de sus georrecursos y, en la medida de lo posible, sus georriesgos. Entendiendo como aspectos geocientíficos los relativos a las Ciencias de la Tierra (Geología, Geomorfología, Hidrología, entre otras) que estudian la estructura interna, la morfología y la dinámica superficial y la evolución del planeta Tierra.

El principal objetivo de este estudio es el desarrollo de un esquema metodológico que facilite la toma de decisiones sobre diferentes formas de uso del suelo, teniendo en cuenta estos aspectos geocientíficos (georrecursos y georriesgos), en un medio semiárido como es la Depresión del Ebro, en el entorno de Zaragoza. Es nuestro propósito llevar a cabo un análisis de la idoneidad o capacidad del terreno para acoger determinados usos del suelo con objeto de identificar los más apropiados para el futuro, de acuerdo con las preferencias específicas del desarrollo sostenible. La consecución de este objetivo implica el llevar a cabo los siguientes objetivos secundarios:

- Caracterización de la zona de estudio y obtención, análisis y tratamiento de la información disponible, para su posterior introducción en un SIG.
- Evaluación de tierras: detección, descripción y modelización de georrecursos y georriesgos con la ayuda de SIG y técnicas de modelización bidimensionales y tridimensionales. El objetivo final de estos modelos es servir como mapas-criterio en un posterior análisis de la idoneidad del terreno para acoger un determinado uso:
 - Georriesgos: susceptibilidad a la aparición de dolinas y a la erosión, vulnerabilidad del acuífero e inundaciones.

- Georrecursos: materias primas (arenas y gravas), suelos para uso agrícola en regadío.
- Otros recursos: áreas naturales ricas desde un punto de vista medioambiental y geocientífico.
- Análisis de la capacidad del terreno para acoger un determinado uso del suelo mediante SDSS (extracción de arenas y gravas, regadío, uso industrial, uso urbano):
 - Análisis de localización óptima: búsqueda de localizaciones óptimas para un determinado uso del suelo.
 - Análisis de alternativas óptimas: ordenar por preferencia las alternativas existentes de localización de una determinada forma de uso del suelo.

Este artículo se centra en la metodología general del proyecto para, con posterioridad, explicar la aplicación de la misma a la cartografía de localización óptima de actividades industriales.

2. Metodología

La [figura 2](#) muestra el volumen de trabajo del proyecto. El primer paso es la obtención de la mayor cantidad de información posible relativa a geología, geomorfología, suelos, vegetación, usos del suelo, etc. Esta información será, con posterioridad, introducida en un SIG. Después, se llevará a cabo una evaluación de tierras con respecto a georrecursos y georriesgos (aspectos geocientíficos), desarrollando diferentes modelos con la ayuda de diversas metodologías de evaluación del terreno. Con posterioridad, todos estos modelos serán incorporados como criterios geocientíficos en un Sistema de Ayuda a la Toma de Decisiones (Decision Support System, DSS) integrado en un SIG, comúnmente conocido como Sistemas de Ayuda a la Decisión Espacial (SDSS), que nos permitirá desarrollar varias cartografías de la capacidad o idoneidad del terreno para albergar un determinado uso del suelo, o, lo que es lo mismo, la localización óptima para un determinado uso del suelo.

Es importante matizar que en nuestro esquema metodológico se llevan a cabo dos tipos de análisis bien diferenciados, por un lado, lo que denominamos Evaluación de tierras, y, por otro lado, el análisis de la capacidad o idoneidad del terreno para acoger diferentes formas de uso del suelo. El primero de ellos es un paso previo para la realización del segundo ya que contempla el desarrollo de modelos de georrecursos y georriesgos (aspectos geocientíficos) que serán incluidos en el segundo como criterios absolutamente necesarios para el análisis de la idoneidad del terreno para un determinado uso del suelo desde el punto de vista del desarrollo sostenible.

2.1. Caracterización del área de estudio

La ciudad de Zaragoza está situada en el sector central de la Depresión del Ebro, en la Comunidad Autónoma de Aragón, en el noreste de la Península Ibérica ([figura 3](#)). La Depresión del Ebro, de forma triangular, limita al norte con los Pirineos, al suroeste con el Sistema Ibérico y al sureste con la Cordillera Costero Catalana.

El relleno terciario, sedimentario continental, de la Cuenca está compuesto por conglomerados y areniscas en los márgenes, pasando por arcillas, margas, evaporitas y carbonatos hacia el centro de la Cuenca (Benito *et al.*, 1998). En el sector central de la Depresión, los depósitos de playa-lake conforman uno de los mayores afloramientos de yesos en el área, sólo cubierta en algunos sectores por los diferentes glacis y terrazas depositados durante el Cuaternario por el río Ebro y sus afluentes.

El clima de este sector tiene características semiáridas, una precipitación media anual de unos 350 mm y una temperatura media anual alrededor de 15 ° C. El clima mediterráneo continental de Zaragoza está también caracterizado por una irregular distribución de las precipitaciones ([figura 4](#)).

La ciudad está situada en el denominado "Corredor del Ebro", un eje económico dentro de la Península Ibérica extremadamente dinámico y con una gran cantidad de población. En estas condiciones de alto impacto antropogénico y clima semiárido, la escasa vegetación presente se reduce a matorrales esclerófilos, estepas en yesos y bosques de ribera.

En la Ley Nacional del Suelo de 1956, la primera regulación sobre el uso del suelo en España, se esperaba un incremento de la población de Zaragoza de unos 500.000 habitantes para el año 2000. Sin embargo, su posición estratégica en el centro de cuatro de los más importantes ejes de desarrollo de la Península Ibérica (Madrid, Barcelona, País Vasco y Valencia), junto con la declaración de la ciudad en 1964 como Polo de Desarrollo Industrial, provocó un gran crecimiento de población alcanzando los 500.000 habitantes en los años setenta. Actualmente, la ciudad tiene una población de unos 700.000 habitantes (más del 60 % de la población total de Aragón) y es de esperar que siga creciendo en los próximos años, debido a la atracción que ha supuesto la organización de la EXPO en 2008 con el título "Agua y Desarrollo Sostenible". Este incremento en población ha sido también acompañado por un desarrollo en superficie de la zona urbana de manera que, en la actualidad, la extensión de la ciudad es más del doble de la ocupada a comienzos del siglo XX ([figura 5](#)).

2.2. Obtención de información

El primer paso es la obtención de información relacionada con las características geológicas, geomorfológicas e hidrogeológicas del terreno, la cubierta del suelo, las propiedades de los suelos, el clima, las infraestructuras y las áreas naturales de gran valor medioambiental que requieren cierta protección para su conservación. Con posterioridad, esta información es incorporada en una base de datos de un SIG, en este caso ArcGIS 9.1 (ESRI, 2005). Esta fase debe estar altamente influenciada por los objetivos finales del trabajo que determinan su carácter dinámico, ya que estos objetivos pueden cambiar a lo largo del tiempo. En esta fase, una buena conceptualización de la base de datos del SIG es fundamental. La recopilación de la información incluye:

- Búsqueda de la mejor información disponible.
- Análisis de sus características.

- Incorporación de la información en un SIG, que implica, a su vez, su correcta georreferenciación y, en algunos casos, conversión de formato.
- Creación de nueva información mediante la digitalización de mapas analógicos o mediante el análisis de fotografías aéreas y ortofotografías.

Una fase paralela es la recopilación de metodologías para la evaluación de tierras: modelización de riesgos (desarrollo de dolinas, vulnerabilidad del acuífero, erosión) y cartografía de recursos (suelos para uso agrícola, materias primas y paisajes naturales).

2.3. Evaluación de tierras: modelización

Los modelos son considerados como representaciones simplificadas del mundo real, los cuales pueden ser expresados en una amplia variedad de formas como, por ejemplo, los diagramas conceptuales, los sistemas de clasificación, y los modelos matemáticos estadísticos o deterministas. En la evaluación de tierras los modelos han avanzado desde simples aproximaciones cualitativas hasta otras basadas en técnicas de inteligencia artificial (Collins, *et al.*, 2001, de la Rosa *et al.*, 2004, Malczewski, 2004).

El primer requerimiento de la modelización es la cuantificación exhaustiva de parámetros a introducir en el modelo. Esta información de partida puede ser obtenida bien directamente de trabajo de campo, o bien derivada de otras fuentes bibliográficas existentes (Cox y Madramootoo, 1998).

El desarrollo de los SIG ha mejorado considerablemente las posibilidades en la modelización para la evaluación de tierras; muy diversas aplicaciones han sido descritas en la bibliografía científica desde los setenta. Sin embargo, el primer paso es siempre la selección de la unidad cartográfica que, a cada escala de trabajo, representa el dominio que maximiza la homogeneidad interna de cada unidad y la heterogeneidad entre unidades. Todas las metodologías para la modelización de la evaluación de tierras parten de la definición de la unidad cartográfica que se integra en uno de los siguientes grupos (Guzzetti *et al.*, 1999): celda-píxel, unidad del terreno, unidad de condiciones únicas o unidad homogénea y cuenca hidrográfica.

La selección de una u otra debe depender de numerosos factores como: el tipo de fenómeno a ser estudiado; la escala de trabajo; la calidad, resolución, escala y tipo de información temática requerida; y, finalmente, la disponibilidad de una adecuada información para su manejo y herramientas de análisis.

En nuestro caso, se ha hecho uso de dos tipos de unidades cartográficas. Las celdas o píxeles han sido utilizadas principalmente para la modelización de depósitos de arenas y gravas (Lamelas *et al.*, 2008b), la vulnerabilidad del acuífero (Lamelas *et al.*, 2007a) y la susceptibilidad al desarrollo de dolinas (Lamelas *et al.*, 2008a); mientras que las unidades homogéneas han sido utilizadas para la modelización de la capacidad agrícola de los suelos y la susceptibilidad a la erosión (Lamelas *et al.*, 2008c).

2.3.1. Metodologías para la evaluación de tierras

Los diferentes procedimientos de evaluación de tierras pueden ser clasificados en dos grupos principales (figura 6): cualitativos y cuantitativos. Los métodos cualitativos incluyen tanto aproximaciones cualitativas como sistemas expertos y métodos paramétricos; son métodos muy flexibles y permiten una completa incorporación del conocimiento experto. Desafortunadamente, estos métodos poseen un gran nivel de subjetividad, que en algunos casos implica que los mapas producidos por diferentes investigadores sean muy distintos. Los métodos cuantitativos incluyen modelos estadísticos, así como metodologías de análisis multicriterio y aproximaciones más recientes basadas en inteligencia artificial como, por ejemplo, los sistemas borrosos, las redes neuronales, los algoritmos genéticos y los autómatas celulares. Aunque un procedimiento completamente objetivo no existe, los métodos cuantitativos aseguran que los mismos resultados puedan ser alcanzados por diferentes investigadores, siempre y cuando sean adoptadas las mismas asunciones básicas (Beguiría y Lorente, 2003; de la Rosa *et al.*, 2004; Guzzetti *et al.*, 1999).

Una de las características principales de las metodologías de análisis multicriterio es la capacidad para integrar juicios de valor (preferencias de los centros de decisión) en los procedimientos de toma de decisiones en los usos del suelo. Estas técnicas han sido utilizadas en análisis de idoneidad del terreno para un determinado uso del suelo y serán, por tanto, descritas con mayor precisión en el apartado 2.4.

Como se ha comentado con anterioridad, tanto los métodos cuantitativos como cualitativos tienen ventajas e inconvenientes, por lo tanto, la elección de una u otra metodología debe basarse en numerosos factores como son; la disponibilidad y calidad de la información necesaria para llevar a cabo los modelos, la posibilidad que obtener información para su validación, la adecuación de la información disponible a la zona de estudio y el objetivo final de los modelos, que en nuestro caso es servir como criterios en el análisis de localización óptima de determinados usos del suelo teniendo en cuenta factores geocientíficos.

En el caso de la zona de estudio que nos ocupa, los factores geocientíficos que han sido objeto de modelización han sido georriesgos; como son la susceptibilidad a la aparición de dolinas y a la erosión y la vulnerabilidad del acuífero (ver Lamelas *et al.*, 2007a, 2008a, 2008c) y georrecursos; arenas y gravas y capacidad agrícola de los suelos (ver Lamelas *et al.*, 2008b, 2008c).

A) Aproximaciones cualitativas

La asignación de las características del terreno puede ser tan simple como el establecimiento de simples frases descriptivas de la evaluación de la tierra para un determinado georrecurso o georriesgo (de la Rosa *et al.*, 2004). Un buen ejemplo de estos métodos es el modelo de susceptibilidad a la erosión desarrollado en este trabajo (Lamelas, 2007; Lamelas *et al.*, 2008c).

B) Sistemas expertos

Los sistemas expertos son programas de ordenador que simulan las habilidades de uno o varios expertos para solucionar problemas en un determinado campo y dan soluciones a ese problema. Estos sistemas expresan conocimiento deductivo por medio de árboles de decisión. Los árboles expertos de decisión están basados en antecedentes científicos (descripción teórica) y resultan de la experiencia y discusiones entre expertos (experiencia práctica); como consecuencia, reflejan el conocimiento experto disponible. Los árboles de decisión son llaves jerárquicas en las que las hojas son las elecciones (las clases/gamas), tal como los niveles característicos de generalización, y los nodos interiores del árbol son los criterios de la decisión. Estos árboles de clasificación y de regresión han sido típicamente utilizados en investigaciones sobre suelos y recursos naturales (de la Rosa *et al.*, 2004). El sistema MicroLEIS, desarrollado por de la Rosa *et al.* (2004), presenta algunos modelos que son buenos ejemplos de aplicación de esta metodología. Gao y Alexander (2003) también aplicaron esta metodología para el desarrollo de un mapa de riesgo de formación de dolinas.

C) Métodos paramétricos

Entre los métodos cualitativos y los cuantitativos se encuentran los métodos semi-cuantitativos; derivados de los efectos numéricamente inferidos de varias características de la tierra en el comportamiento potencial de un sistema de uso del suelo. Los métodos paramétricos pueden ser considerados como una fase de transición entre los métodos cualitativos, basados en juicios expertos, y los modelos matemáticos. Tienen en cuenta las interacciones entre los factores más significativos mediante la simple multiplicación o adición de índices de los factores (de la Rosa *et al.*, 2004). Uno de los ejemplos más conocidos de esta metodología es la Ecuación Universal de Pérdida del Suelo (Universal Soil Loss Equation –USLE) (Wischmeier y Smith, 1978) para la susceptibilidad a la erosión.

D) Modelos estadísticos

En la evaluación de tierras, los modelos estadísticos son potentes métodos empíricos para la predicción de la idoneidad o potencialidad del territorio en función de las características del terreno. Las aproximaciones estadísticas están orientadas a datos, modelos de "caja negra", y sus resultados no implican una relación causa-efecto (pero pueden dar certeza a hipótesis bien enunciadas). Además con la introducción de variables adecuadas, los modelos estadísticos pueden dar resultados satisfactorios para una determinada área de estudio; sin embargo, sus conclusiones difícilmente pueden ser aplicadas a otros lugares, o usadas para probar escenarios de simulación. En la bibliografía científica se ha observado una presencia de diferentes aproximaciones estadísticas multivariante incluyendo regresión lineal, análisis discriminante y regresión logística. La naturaleza de la variable dependiente y las independientes debe determinar la selección del método más apropiado (Beguiría y Lorente, 2003). La técnica de regresión logística que ha sido utilizada en este trabajo para la evaluación de la susceptibilidad a la aparición de fenómenos de dolina pertenece a este tipo de metodologías (Lamelas, 2007; Lamelas *et al.*, 2008a).

E) Técnicas de evaluación multicriterio

La Evaluación Multicriterio (EMC) puede definirse como un conjunto de técnicas orientadas a asistir en los procesos de toma de decisiones (Gómez-Delgado y Barredo, 2005). El fin básico de las técnicas de EMC es comparar una serie de alternativas en función de varios criterios teniendo en cuenta las preferencias del centro decisor.

F) Técnicas basadas en inteligencia artificial

En la última década se han desarrollado diversos paradigmas que integran componentes de la inteligencia artificial y SIG. Estos modelos híbridos incluyen principalmente la integración de los sistemas borrosos, las redes neuronales, los algoritmos genéticos y los autómatas celulares. Todos estos modelos, se enmarcan en la denominada inteligencia computacional o soft computing (Malczewski, 2004).

Los sistemas borrosos (fuzzy systems) emulan el razonamiento aproximado de nuestro cerebro, permitiendo manejar conceptos vagos e imprecisos como los empleados en la vida cotidiana. Esta teoría está diseñada para tratar problemas, elementos, clases, etc. sin límites bien definidos (como casi todos en el mundo real, por otro lado) y se sustenta en la idea de que el mundo no está compuesto por partículas elementales indivisibles y discretas, sino que se trata de un continuo con diferentes propiedades en diferentes localizaciones (Gómez-Delgado y Barredo, 2005).

Las redes neuronales muestran una gran capacidad para tratar con sistemas multivariante no lineales. Además, pueden procesar las pautas de entrada nunca antes presentadas, de manera casi igual al cerebro humano. Recientemente, han surgido conexiones entre las técnicas de redes neuronales y sus aplicaciones en ingeniería, agricultura y ciencias ambientales (de la Rosa *et al.*, 2004).

Los Algoritmos Genéticos (AGs) son métodos adaptativos que pueden usarse para resolver problemas de búsqueda y optimización. Están basados en el proceso genético de los organismos vivos. A lo largo de las generaciones, las poblaciones evolucionan en la naturaleza de acorde con los principios de la selección natural y la supervivencia de los más fuertes, postulados por Darwin (1859). Por imitación de este proceso, los Algoritmos Genéticos son capaces de ir creando soluciones para problemas del mundo real. La evolución de dichas soluciones hacia valores óptimos del problema depende en buena medida de una adecuada codificación de las mismas (Malczewski, 2004).

Los autómatas celulares permiten simular ciertos fenómenos complejos con la integración de células finitas, que interactúan de acuerdo a reglas simples basadas en consideraciones heurísticas. Las reglas de interacción que generalmente se aplican a los vecinos inmediatos, pueden o no guardar una semejanza con las leyes físicas que gobiernen el fenómeno.

2.4. Análisis de la idoneidad del terreno para diferentes usos del suelo

El objetivo final de este proyecto es la realización de un análisis de la capacidad o idoneidad del terreno para acoger diferentes usos del suelo. Ampliamente definido, el propósito de este análisis es el identificar el modelo espacial más apropiado para la localización de futuros usos del suelo, de acuerdo con unos requerimientos y preferencias específicos (Collins *et al.*, 2001; Hopkins, 1977; Malczewski, 2004).

El análisis de la idoneidad del terreno para acoger usos del suelo basado en SIG ha sido ampliamente utilizado en una gran variedad de situaciones; incluyendo estudios ecológicos y geológicos, idoneidad de actividades agrícolas, evaluación de impacto ambiental, localización óptima de diferentes infraestructuras y planeamiento regional (Collins *et al.*, 2001; Hoppe *et al.*, 2006; Jakowski, 1995; Lamelas *et al.*, 2006a, 2006b, 2008b; Malczewski, 1999, 2004; Marinoni y Hoppe, 2006; Pereira y Duckstein, 1993).

Cualquier proceso de planeamiento debe orientarse a la incorporación de una mezcla de información objetiva y subjetiva. La información objetiva se deriva de hechos comentados, estimaciones cuantitativas e investigaciones sistemáticas de opinión (encuestas). La información subjetiva representa las opiniones (preferencias, prioridades, juicios, etc.) de los grupos de interés y los centros de decisión (decision maker). La EEDS plantea como eje transversal el impulsar la participación ciudadana, de las empresas y de los interlocutores sociales en los procesos de toma de decisiones. La idea de combinar los elementos subjetivos y objetivos de todo proceso de planeamiento en un sistema informatizado recae sobre el concepto de Sistemas de Ayuda a la Decisión Espacial (SDSS, Spatial Decision Support System) (Malczewski, 2004).

Estos sistemas pueden ser definidos como un sistema informatizado, interactivo, diseñado para apoyar a un usuario o grupo de usuarios a alcanzar un alto grado de efectividad en la toma de decisiones, mientras soluciona un problema de decisión espacial semiestructurado (Malczewski, 2004). Un SDSS también se refiere a la combinación de metodologías sofisticadas para el apoyo a la toma de decisiones (técnicas de EMC) y SIG (Gómez-Delgado y Barredo, 2005; Malczewski, 2004; Marinoni, 2005; Jankowski, 1995).

Aunque la consagración del análisis multicriterio se realiza a partir de los años 70 (la primera reunión científica dedicada íntegramente a la toma de decisiones se celebró en Carolina del Sur) podemos situar sus antecedentes en el siglo XVIII. Las reflexiones políticas en Francia sobre la acción de los jueces y su traslación a la política (elección social), lleva a personajes como Condorcet a profundizar sobre la toma de decisiones a la luz de varios criterios (Gómez-Delgado y Barredo, 2005).

Tal y como se ha comentado con anterioridad, es a partir aproximadamente del año 1991 (Gómez-Delgado y Barredo, 2005), en la denominada cuarta etapa de evolución en los SIG, cuando se desarrollan los análisis de decisión. Los trabajos de Voogd (1983), Janssen y Rietveld (1990), Carver (1991), Can (1993), Pereira y Duckstein (1993), Barredo y Bosque (1995), Bosque *et al.* (1999), Thill (1999), Eastman *et al.*, (1993), entre mucho otros, indican la tendencia de integración de técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC) y SIG, tratando de solventar de algún modo las

carencias analíticas de los SIG (Gómez-Delgado y Barredo, 2005). Wallenius *et al.* (2008), hacen un estudio de la evolución de la utilización de las técnicas de EMC desde el año 1992 hasta el 2006, revelando que la utilización de técnicas multiatributo se ha incrementado en 4,2 veces en este periodo.

En los últimos años se ha realizado un gran esfuerzo en la integración de técnicas de EMC y GIS en Internet (ver Carver 1999, Rinner, C y Malczewski, 2002; Zhu y Dale, 2001, Rinner, 2003).

Las metodologías de EMC (o reglas de decisión) definen una relación en los mapas de entrada y los de salida. Estas metodologías implican la utilización de datos geográficos, las preferencias del agente de la decisión y la manipulación de esta información y preferencias de acuerdo con unas reglas de decisión específicas.

Las metodologías de evaluación multicriterio han sido duramente criticadas por su subjetividad. Sin embargo, es importante no olvidar que las decisiones sobre los usos del suelo son tomadas por agentes que son los que finalmente deben decidir entre diferentes usos, por lo que, el proceso de toma de decisiones siempre tendrá una parte importante de subjetividad. Las metodologías de evaluación multicriterio han hecho un gran esfuerzo por introducir tanta objetividad como es posible en un proceso altamente subjetivo.

Sin embargo, la integración de estas técnicas sigue planteando ciertos problemas o inconvenientes en el momento de realizar aplicaciones específicas. Entre los inconvenientes más notables destacan (Gómez-Delgado y Barredo, 2005):

- La imposibilidad de aplicación de los métodos de EMC basados en la comparación por pares con largas series de datos, debido a las restricciones que plantean los actuales sistemas informáticos en este sentido.
- La dificultad que presentan algunos métodos de EMC en su implementación metodológica, lo que genera por consiguiente un difícil análisis de los resultados, así como un desconocimiento del procedimiento interno de los métodos por parte de usuarios no especialistas en EMC.
- La necesidad de generar en muchos de los casos programas de procesamiento de los datos anexos a los SIG, basados en algoritmos que describan los métodos de EMC, lo que obviamente ocasiona que muchos usuarios de estos sistemas no puedan acceder a dichos métodos.

Existen en la bibliografía científica diferentes intentos de clasificar los métodos de decisión multicriterio por diversos autores (Gómez-Delgado y Barredo, 2005, Jankowski, 1995; Malczewski, 1999; Pereira y Duckstein, 1993; Vincke, 1986; Voogd, 1983). Unos diferencian entre multiatributo y multiobjetivo, mientras otros distinguen entre técnicas compensatorias y no compensatorias, así como deterministas y borrosas. La mayoría coincide en que las reglas aditivas de decisión (Sumatoria lineal ponderada, Análisis de la concordancia, Jerarquías analíticas, etc.) son los métodos para la toma de decisión multiatributo más conocidos y ampliamente utilizados en el proceso de toma de decisiones basado en la utilización de SIG. A continuación pasamos a describir brevemente algunas de las técnicas que más comúnmente aparecen en la literatura:

- Sumatoria lineal ponderada (Simple Additive Weighting methods SAW or Weighted Linear Combination, WLC) son las técnicas más comúnmente utilizadas para llevar a cabo toma de decisiones espaciales multiatributo. Estas técnicas aditiva y compensatoria están basadas en el concepto de media ponderada.
- El método de Sumatoria lineal ponderada ordenada (Ordered weighted average, OWA) se incluye en algunos casos en las técnicas borrosas, pero más que un método borroso, sería una generalización de tres tipos básicos de funciones de agregación: la intersección de conjuntos borrosos, la unión de conjuntos borrosos y los operadores de medias.
- El método de Jerarquías analíticas (Analytical Hierarchy Process, AHP), desarrollado por Saaty (1977), también se trata de una técnica aditiva y compensatoria que está basada en tres principios: descomposición, juicio comparativo, síntesis de prioridades.
- Los métodos de concordancia (Concordance methods) están basados en la comparación por pares de alternativas, de la cual se deriva una clasificación ordinal. Estos métodos también son conocidos como técnicas de superación (Outranking techniques).
- El Análisis del Punto Ideal (Ideal point) ordena un conjunto de alternativas a partir de su separación del punto ideal que se considera inalcanzable; posteriormente se compara la distancia entre cada alternativa y el ideal en un espacio multivariado, donde cada criterio representa un eje. El punto ideal puede ser considerado tanto como uno o muchos puntos posibles que pueden ser usados para ordenar un grupo posible de alternativas. Este análisis se encuentra incluido en las técnicas compensatorias basadas en la aproximación al punto ideal.
- El método TOSIS (Technique for order Preference by Similarity to Ideal Solution), también incluido en las técnicas compensatorias basadas en la aproximación al punto ideal, basa su funcionamiento en el cálculo de las distancias al punto ideal y al punto anti-deal (la mejor alternativa sería, en este caso, la más lejana posible a este punto).

En el contexto del análisis de la idoneidad o capacidad del terreno para determinados usos del suelo es importante diferenciar entre el problema de la selección de alternativas óptimas (site selection problem) y el problema de búsqueda de localización óptima (site search problem). El propósito del análisis de alternativas óptimas es identificar la mejor localización para una determinada actividad, dado un grupo de localizaciones posibles. El problema es ordenar las alternativas de localización por preferencia, basándose en sus características, de manera que se identifica la mejor localización. En el caso de que no exista un grupo determinado de alternativas, el problema se define como un análisis de localización óptima (Malczewski, 2004).

En esta investigación se llevan a cabo las dos aproximaciones. Primero se realiza un análisis de localización óptima, donde cada píxel representa una alternativa de localización, mediante la integración del método SAW en SIG. Posteriormente, comenzando por la localización de alternativas predefinidas, se lleva a cabo un análisis de alternativas óptimas mediante la utilización de la metodología PROMETHEE-2 (Brans *et al.*, 1986). Todas estas herramientas, utilizadas en el trabajo, han sido programadas por Oswald Marinoni (Marinoni, 2004) para su integración en ArcGIS 9.1.

En los métodos SAW, el agente de decisión asigna directamente los pesos de importancia relativa a cada atributo. La cuenta total se obtiene para cada alternativa mediante la multiplicación del peso de importancia asignado a cada atributo por el valor dado a cada alternativa en dicho atributo y sumando los productos de todos los atributos. La mayor desventaja de este método es que tiende a tener escasos fundamentos teóricos. Sin embargo, como son fáciles de usar, los métodos SAW han sido ampliamente utilizados en la vida real (Eastman, 1997; Heywood *et al.*, 2002; Janssen y Rietveld, 1990; Malczewski y Rinner, 2005). Es importante resaltar que existen dos asunciones implícitas en los métodos SAW: linealidad y adición de criterios (Hwang y Yoon, 1981; Malczewski, 2000). La primera asunción significa que la conveniencia de una unidad adicional de un criterio es constante para cualquier nivel de ese criterio. La asunción de adición implica que los criterios a considerar son mutuamente independientes entre ellos con respecto a la preferencia.

PROMETHEE-2 pertenece a la familia de métodos de concordancia (outranking techniques). Estos métodos utilizan la función de preferencia $P_j(a,b)$, la cual es una función de la diferencia d_j entre dos alternativas para un determinado criterio j (Brans *et al.*, 1986). Se han propuesto seis tipos de funciones basadas en la noción de criterio, que son (ver [figura 7](#)):

- criterio usual (usual criterion): la preferencia, $H(d)$, es 0 cuando no existe diferencia entre los valores de las alternativas a comparar. En el caso de que exista diferencia entre alternativas, $d > 0$, la preferencia es 1.
- cuasi criterio (quasi criterion): en este caso se debe definir un umbral de indiferencia, q . Este representa el mayor valor de la diferencia por debajo del cual el gestor de la decisión decide que existe indiferencia entre las alternativas. La preferencia es 0 si $d \leq q$, y 1 en el resto de los casos.
- criterio con preferencia lineal (criterion with linear preference): el valor de preferencia y la distancia entre alternativas sigue una función lineal. Se debe definir un valor de preferencia estricta, p , que representa el valor más bajo de diferencia a partir del cual el gestor de la decisión considera que existe una preferencia estricta de una alternativa sobre otra. El valor de preferencia puede ser cualquier valor entre 0, no preferencia, y 1, máxima o estricta preferencia.
- criterio por niveles (level criterion): existen tres niveles de preferencia. Los parámetros a definir son q y p . La preferencia es 0 si $d \leq q$, 0.5 si d se encuentra entre los umbrales q y p , y 1 si d es mayor que p .
- criterio con preferencia lineal y área de indiferencia (criterion with linear preference and indifference area): esta función es similar a la tercera descrita, pero el parámetro q también debe ser introducido.
- criterio gaussiano (gaussian criterion): se debe definir el parámetro σ , que esta directamente relacionado con la desviación estándar de una distribución normal.

Todas estas funciones están integradas en la herramienta desarrollada por Oswald Marinoni (Marinoni, 2004) para ArcGIS 9.1. En esta metodología se calcula un índice de preferencia multicriterio (media ponderada de las funciones de preferencia), a partir del cual se obtiene el orden de preferencia de las alternativas evaluadas (Raju y Pillai, 1999).

Una de las principales particularidades en la utilización de PROMETHEE-2 es la carencia de necesidad de estandarizar las variables que pueden ser utilizadas en sus unidades de origen debido al carácter comparativo de esta metodología. Por esta razón es importante decidir si el incremento en el valor de un determinado criterio implica un incremento o un descenso en la capacidad del terreno para acoger un determinado uso. Además, como cada alternativa (localizaciones poligonales vectoriales) está compuesta por varios valores en cada criterio (los diferentes píxeles que están dentro de su límite), y PROMETHEE-2 solo admite un único valor, éste tiene que ser definido. La herramienta desarrollada por Oswald Marinoni ofrece diferentes alternativas: valor máximo, mínimo, media más una desviación estándar, media menos una desviación estándar. En nuestro caso, se ha elegido el valor medio para todos los casos al considerar que es el valor que mejor representa la totalidad de cada alternativa ya que los valores mínimos y máximos se corresponden con eventos raros de escasa probabilidad de ocurrencia.

Las ventajas de los métodos de concordancia incluyen la habilidad para considerar los dos tipos de criterios, tanto objetivos como subjetivos, y el requerimiento mínimo de información por parte del agente de la decisión. Pero estas técnicas requieren la comparación por pares de todas las alternativas, lo que es obviamente impracticable para aplicaciones donde el número de alternativas/píxeles en una base de datos es del orden de decenas y cientos de miles (Pereira y Duckstein, 1993).

A pesar de la existencia de diversas metodologías, los métodos para la toma de decisiones multicriterio tienen ciertos aspectos en común. Las alternativas representan las diferentes elecciones de acción de los agentes de decisión. Los atributos múltiples representan el nivel más bajo de los criterios de decisión; se asignan pesos de decisión a dichos atributos. Normalmente, estos pesos se normalizan para sumar la unidad (Gilliams *et al.*, 2005).

Por tanto, un problema fundamental en la teoría de la decisión es cómo asignar pesos a un conjunto de criterios de acuerdo con su importancia. Un método para la evaluación de pesos, excelente y ampliamente conocido, es el AHP. Este método, usado en las dos aproximaciones desarrolladas en este trabajo (análisis de localización y alternativa óptima) para la asignación de los pesos, implica la comparación de pares de criterios para la creación de una matriz ratio. Específicamente, los pesos son determinados mediante la normalización del autovector asociado con el autovalor de la matriz ratio. El procedimiento consiste en tres pasos principales: generación de la matriz de comparación de pares, el cálculo de los pesos de los criterios y la estimación del índice de consistencia (Saaty, 1977). Aplicaciones empíricas sugieren que este método de comparación por pares es una de las técnicas más efectivas para la toma de decisiones espaciales que incluyen aproximaciones basadas en SIG (Eastman *et al.* 1993); Malczewski *et al.* 1997). Existen una gran cantidad de ejemplos bien documentados de la aplicación de este método con éxito (Banai, 1993, Banai-Kashani, 1989, Miller *et al.*, 1998, Malczewski, 1996)

De acuerdo con Marinoni (2004) la incorporación del AHP en un SIG combina las metodologías de apoyo a la toma de decisiones con una visualización potente y unas capacidades cartográficas, las cuales, en definitiva, deberían facilitar considerablemente la creación de mapas de idoneidad de los usos del suelo.

Para llevar a cabo las dos aproximaciones; el análisis de localización óptima, donde cada píxel representa una alternativa de localización, y análisis de alternativas óptimas, se deben seguir varios pasos ([figura 8](#) y [figura 9](#)):

- Definición de alternativas: en el caso de la búsqueda de localización óptima (site search problem) cada píxel representa una alternativa, mientras que para el análisis de alternativas óptimas éstas deben estar definidas.
- Definición de limitantes: áreas con restricciones para un determinado uso.
- Definición de las variables: factores que tienen un papel importante en el proceso de decisión y, por lo tanto, deben ser tenidos en consideración.
- Transformación de las variables en criterios: estandarización de las variables. Éste únicamente es necesario en el análisis de localización óptima debido al carácter comparativo de los métodos de concordancia.
- Asignación de pesos de decisión: en nuestro caso, mediante la utilización del AHP.

3. Aplicación al análisis de localización óptima de actividades industriales

3.1. Definición de alternativas

Tal y como se ha mencionado con anterioridad en el caso de búsqueda de localización óptima cada píxel representa una alternativa, por lo que las alternativas ya están definidas.

3.2. Definición de las limitantes

En el caso de limitantes para uso industrial en el entorno de Zaragoza, las restricciones de uso encontradas han sido las siguientes:

- Espacio Natural Protegido: Reserva Natural de los Galachos de La Alfranca, Pastriz, La Cartuja y El Burgo de Ebro.
- Espacios urbanizados: Cartografiados a partir del Mapa Topográfico Nacional (MTN), a escala 1:25.000, del Instituto Geográfico Nacional (IGN).
- Infraestructuras y sus áreas de protección: Carreteras, vías de tren, canales, etc. Cartografiadas a partir del MTN a escala 1:25000.
- Planificación: Plan General de Ordenación Urbana de Zaragoza (PGOUZ) y Plan de Ordenación de los Recursos Naturales (PORN) del Ebro.
- Vías Pecuarias: Reguladas por la LEY 10/2005, de 11 de noviembre, de Vías Pecuarias de Aragón y cartografiadas a partir de información proveniente del Gobierno de Aragón (DGA).
- Polígonos industriales totalmente construidos y ocupados. Información proveniente del Instituto Aragonés de Fomento (IAF) de la DGA.

3.3. Definición de las variables

Se trata de factores que tienen un papel importante en el proceso de decisión y, por lo tanto, deben ser tenidos en consideración. Una gran variedad de criterios sociales y medioambientales han sido considerados ya que nuestro principal objetivo es el promover un desarrollo sostenible. Éstos son:

- Evitar la afección a espacios naturales de importancia: Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPAS) designadas por la Directiva 79/409/CEE del Consejo, de 2 de abril de 1979, relativa a la conservación de las aves silvestres, Hábitats designados por la Directiva 92/43/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1992, relativa a la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres, Puntos de Interés Geológico incluidos en el inventario del Gobierno de Aragón y otras áreas naturales cuya cartografía ha sido cedida, principalmente, por el Gobierno de Aragón.
- Susceptibilidad del terreno al desarrollo de dolinas: Modelización realizada mediante la técnica de la Regresión Logística (Lamelas, 2007; Lamelas *et al.*, 2008a).
- Protección del agua subterránea: Análisis del terreno y modelización realizado mediante la utilización del modelo de Hölting *et al.* (1995), desarrollado por el Servicio Geológico Alemán, integrado en SIG (Lamelas *et al.*, 2007a).
- Riesgo de inundación: Cartografiado a partir de la georreferenciación y digitalización de los mapas analógicos elaborados por Ollero (1996).
- Capacidad agrícola de los suelos: Cartografía realizada mediante la aplicación del Modelo Cervatana (C.S.I.C., 1996; de la Rosa y Magaldi, 1982; de la Rosa *et al.*, 2002, 2004) en SIG (Lamelas, 2007, Lamelas *et al.*, 2008c). Se trata de un modelo cualitativo para evaluar la capacidad general agrícola de los suelos que utiliza los siguientes factores: relieve, suelos, clima y cubierta del suelo.
- Pendiente del terreno: Desarrollada a partir del Modelo Digital de Elevaciones (MDE), resolución 20x20 m, del Ministerio de Agricultura (SIG Oleícola).
- Caracterización geotécnica del subsuelo: modelo desarrollado a partir del Mapa Geológico a escala 1:50.000 (serie MAGNA) del Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

3.4. Transformación de las variables en criterios

Las variables deben ser estandarizadas para su incorporación como criterios en el proceso de localización óptima. En nuestro caso, el método de estandarización utilizado puede incluirse en la aproximación de escalas subjetivas (Malczewski, 2004) ya que las variables se clasifican de acuerdo a unos rangos subjetivos. Estos rangos se determinan siguiendo, en algunos casos, las indicaciones de las Leyes medioambientales o, en otros casos, los rangos ya establecidos en los modelos desarrollados para la evaluación de tierras.

La metodología de estandarización también se puede insertar en la aproximación a la función valor, en la que un valor, que determina la buena o mala idoneidad del terreno para la localización de un determinado uso, es seleccionado. De esta forma, las variables se han clasificado en 6 categorías: valores de 1 a 3 representan los peores valores de idoneidad, mientras que los valores de 4 a 6 representan los más óptimos.

La elección de 6 categorías para la estandarización de las variables es consecuencia de la adaptación de este número de clases a las variables introducidas ya que el mayor número de clases en los modelos que serán introducidos en el análisis es 5. Es necesario reservar una categoría para las zonas fuera de los modelos, en el caso de modelos que no cubren la totalidad de la zona de estudio. Éste es el caso de la susceptibilidad del terreno a la formación de dolinas y la protección del agua subterránea, entre otros. En estos dos casos, por ejemplo, el mayor valor de idoneidad (valor 6) ha sido asignado a las zonas fuera del modelo ya que la protección del agua subterránea es mayor en las zonas localizadas fuera del Acuífero Cuaternario y, en el caso del desarrollo de dolinas, la mayoría de los expertos convienen que las zonas más peligrosas son las zonas de Karst cubierto, en donde los depósitos cuaternarios se apoyan directamente sobre las depósitos terciarios. Por lo tanto, es posible asumir que en las zonas localizadas fuera del modelo, en donde los depósitos terciarios afloran en superficie, la susceptibilidad al desarrollo de dolinas es menor.

3.4.1. Localización de espacios naturales

Se ha utilizado la exacta localización de las áreas descritas con anterioridad ya que las mismas no están estrictamente protegidas por ley, pero su utilización para un determinado uso depende de la Evaluación de Impacto Ambiental. Por tanto, se han asignado simplemente dos categorías de las 6 posibles; valor 1 a las zonas dentro del perímetro de delimitación del espacio natural y valor 6 para el resto de zonas ([figura 10](#)).

3.4.2. Protección del agua subterránea

Tal y como se ha mencionado con anterioridad, los rangos utilizados son los correspondientes al modelo elaborado en la fase de análisis del terreno (Hölting *et al.*, 1995; Lamelas *et al.*, 2007a). Estos valores pueden ser consultados en la [tabla 1](#).

3.4.3. Susceptibilidad al desarrollo de dolinas

En este caso los valores ([tabla 2](#)) también coinciden con los de la modelización realizada mediante la técnica de la Regresión Logística (Lamelas, 2007; Lamelas *et al.*, 2008a).

3.4.4. Riesgo de inundación

Cartografiado a partir los mapas elaborados por Ollero (1996) en los que diferencia tres periodos de retorno: periodo de retorno de 5 años, periodo de retorno de 50 años y periodo de retorno de 500 años. Estos valores pueden ser consultados en la [tabla 3](#).

3.4.5. Capacidad agrícola de los suelos.

Clasificado en función de la cartografía realizada siguiendo el modelo Cervatana (C.S.I.C., 1996; de la Rosa *et al.*, 2002, 2004) en SIG (Lamelas, 2007, Lamelas *et al.*, 2008c). En este caso a las áreas que no presentan suelo se les asigna el peor valor de idoneidad (1) ya que son las zonas ya urbanizadas que no pueden albergar un nuevo uso industrial ([tabla 4](#)). Los suelos con mejor capacidad agrícola obtienen el valor 3 (también mala idoneidad) y los suelos con las peores capacidades agrícolas obtienen los peores valores de idoneidad (valores de 4 a 6).

3.4.6. Pendiente del terreno

Este criterio ha sido elaborado a partir de los porcentajes de pendiente. Los rangos fueron determinados siguiendo las indicaciones de algunos expertos de la Sección de Urbanismo del Ayuntamiento de Zaragoza. Se eligió el valor de 10 % de pendiente como un valor umbral entre buena y mala idoneidad del terreno (valores 3 y 4). Además, se dio los mejores valores de idoneidad a las zonas planas con pendientes por debajo del 2% y las zonas con pendientes superiores al 30%, que no son buenas para la construcción, obtuvieron el valor 1 ([tabla 5](#)).

3.4.7. Caracterización geotécnica del subsuelo

De acuerdo con el plan de Ordenación Urbana del municipio de Zaragoza, el terreno se puede dividir en tres sectores en función de las características geotectónicas del mismo. En nuestro caso a las zonas con malas características geotectónicas se les ha dado valor 1 y las zonas con medias y buenas características tectónicas se les ha asignado valores 3 y 6, respectivamente ([tabla 6](#)).

3.5. Asignación de pesos de decisión

Tal y como se mencionaba con anterioridad, un problema fundamental en la teoría de la decisión es cómo asignar pesos a un conjunto de criterios de acuerdo con su importancia. El AHP es un método excelente y ampliamente conocido para esta tarea. Este método implica la comparación de pares de criterios para la creación de una matriz ratio. Específicamente, los pesos son determinados mediante la normalización del autovector asociado con el autovalor de la matriz ratio. El procedimiento consiste en tres pasos principales: generación de la matriz de comparación por

pares, el cálculo de los pesos de los criterios y la estimación del índice de consistencia (Saaty, 1977).

Para la comparación por pares, es preciso asignar valores numéricos que expresen la preferencia de un criterio frente a otro. Para ello, Saaty (1977) sugirió una escala de comparación que consiste en la asignación de valores entre 1 y 9; el valor 1 expresa igual importancia entre pares de criterios y el valor 9 la prevalencia extrema de un criterio sobre otro ([tabla 7](#)).

Con posterioridad, los valores asignados son sintetizados para determinar el orden de preferencia de los criterios en términos de valores numéricos que equivalen a los pesos de los criterios. Para ello, son calculados los eigenvalores y eigenvectores de la matriz cuadrada de preferencia (Marinoni 2004). De acuerdo con Saaty y Vargas (1991), es suficiente calcular los pesos usando el eigenvector resultante del mayor eigenvalor ya que éste contiene información suficiente para determinar la importancia relativa de los criterios.

Saaty (1977) creó un índice numérico (ratio de consistencia, CR) para valorar la consistencia de la matriz de comparación de criterios ya que, aunque los valores de preferencia no son asignados normalmente de manera arbitraria, éstos pueden ser inconsistentes y llevar a perturbaciones en los cálculos de eigenvectores. A continuación se ilustra la fórmula:

$$CR = CI / RI$$

siendo CI = índice de consistencia, RI= índice de consistencia medio.

El índice de consistencia medio fue calculado por Saaty (1977) como la consistencia media de varias matrices de orden n que se rellenaron con valores aleatorios. De acuerdo con Saaty (1977), las matrices con un orden mayor de 8 tienen un RI del orden de 1,45. El índice CI se calcula directamente de la matriz de preferencia mediante la siguiente fórmula:

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / n - 1$$

donde λ_{\max} es el mayor eigenvalor de la matriz de preferencia y n el orden de magnitud de la matriz. Es recomendable que el ratio de consistencia presente valores por debajo de 0,1.

La [tabla 8](#) muestra la matriz de preferencia y los pesos asignados a cada criterio. En este caso, el ratio de consistencia, que mide la consistencia de los valores asignados a la matriz, presenta un valor de 0,0227, que está por debajo del valor 0,1 recomendado por Saaty (1977).

Los pesos asignados a los criterios tienen una gran influencia en los resultados por lo que la determinación de los valores de preferencia suele estar sujeta a debate entre los grupos involucrados en la toma de decisiones (Hoppe *et al.*, 2006). De acuerdo con Erkurt y Moran (1991), Massam (1991), Ballard y Kuhn (1996) y Gómez Delgado y Barredo (2005), especialmente en el campo de la planificación territorial, sería recomendable y conveniente tener en cuenta los distintos puntos de vista de un grupo interdisciplinar para otorgar el peso adecuado a cada criterio. Por esta razón, en

este caso, los valores de preferencia han sido seleccionados tras mantener varias conversaciones con diferentes expertos en el Ayuntamiento de Zaragoza, Gobierno de Aragón y Confederación Hidrográfica del Ebro. Definitivamente, los mayores pesos se han asignado a la protección de acuíferos (0,289) y de espacios naturales (0,289) ya que desde nuestro punto de vista el primer objetivo de un desarrollo sostenible es la protección de los recursos. Los siguientes criterios en importancia son los diferentes riesgos (desarrollo de dolinas, 0,174; inundación, 0,113). Éstos se consideran menos importantes ya que pueden ser evitados mediante el empleo de nuevas técnicas constructivas. Éste es el mismo caso de los dos últimos factores en importancia; pendiente (0,025) y caracterización geotectónica (0,043).

Finalmente, siguiendo la metodología de ponderación aditiva simple (SAW), todos los factores clasificados (criterios) son multiplicados por sus correspondientes pesos y son sumados.

4. Resultados y validación

La validación de un modelo consiste en comprobar si la estructura del modelo es adecuada para obtener el fin perseguido y con él se consigue un nivel aceptable de precisión en las predicciones. En el caso de modelos explicativos o predictivos, normalmente esta validación se lleva a cabo comprobando el grado de acuerdo entre los datos arrojados por el modelo y los datos del sistema real (Gómez-Delgado, y Barredo, 2005). Para el caso del análisis de capacidad del terreno para acoger actividades industriales mediante la aplicación de SDSS para validar el modelo se ha comprobado que el modelo sigue las preferencias seleccionadas en la asignación de los pesos de los criterios. La [figura 10](#) muestra los resultados del análisis de la idoneidad del terreno para la localización industrial teniendo en cuenta principalmente aspectos geocientíficos. La mejor localización para nuevos establecimientos industriales, según estos resultados, es sobre los glaciares y materiales terciarios, fuera de espacios con valores naturales importantes y en espacios donde la protección del acuífero es mayor y el riesgo de inundación es menor, aunque las características geotécnicas no sean las más favorables. Estas ubicaciones cumplen con las preferencias que se han utilizado para la elaboración del modelo. La peor localización es la llanura de inundación que presenta bajos valores de protección del acuífero y una gran cantidad de espacios con un gran valor natural en los márgenes de los ríos, así como las terrazas altas aunque presentan una mayor susceptibilidad al desarrollo de dolinas.

Además, para comprobar la robustez de los resultados se ha llevado a cabo un análisis de la sensibilidad del modelo que ha consistido en la modificación del objetivo final hacia la obtención de un desarrollo que preste mayor importancia al beneficio económico y cambiando por tanto las preferencias en los criterios y los pesos asignados a los mismos. La [tabla 9](#) muestra los valores asignados en la matriz de preferencia y los pesos de cada criterio. En este caso, el ratio de consistencia presenta un valor de 0,0227, que está por debajo del valor 0,1 recomendado por Saaty (1977). Los mayores pesos se han asignado a la susceptibilidad al desarrollo de dolinas (0,3492) y al riesgo de inundaciones (0,1378) que podrían causar la destrucción de las industrias que se localizasen en un futuro en los sitios seleccionados por el modelo, con las consecuencias económicas que ello conllevaría. Además, la pendiente y las características geotectónicas del subsuelo también presentan altos valores en sus pesos (0,1892 y 0,1378, respectivamente), ya que

las dificultades del terreno para la construcción pueden llegar a incrementar los presupuestos de construcción. La [figura 11](#) muestra los resultados obtenidos en las dos aproximaciones realizadas con diferentes objetivos y se puede observar como los resultados no difieren mucho entre una y otra aproximación ya que las mejores localizaciones para uso industrial con un objetivo más económico, al igual que en el modelo inicial, son los glaciares y los materiales terciarios. Estos últimos, aunque presentan malas características geotectónicas, presentan una menor susceptibilidad al desarrollo de dolinas y un menor riesgo de inundación que las terrazas bajas y por esta razón presentan valores más elevados en el modelo. En este caso, los resultados no difieren mucho ya que la distribución de los factores que adquieren los mayores pesos en las dos aproximaciones es similar de manera que coincide que las zonas con menores valores de protección del acuífero y donde se concentran gran cantidad de espacios naturales se localizan en las terrazas bajas que, a su vez, presentan mayores valores de susceptibilidad al desarrollo de dolinas y un mayor riesgo de inundación. Sin embargo, tal y como se ha comentado con anterioridad, por lo general, los pesos asignados a los criterios tienen una gran influencia en los resultados.

5. Conclusiones

El principal objetivo de este estudio era el desarrollo de un esquema metodológico que facilite la evaluación de georriesgos y georrecursos y la toma de decisiones sobre diferentes formas de uso del suelo, teniendo en cuenta estos aspectos geocientíficos, en grandes ciudades en expansión y crecimiento, en un medio semiárido, como es el caso de los alrededores de Zaragoza. A este respecto, el esquema de trabajo seguido podría servir como una aproximación metodológica para apoyar el desarrollo sostenible en grandes ciudades en expansión y crecimiento. Esto cubriría las demandas y el objetivo principal de la Agenda 21, cuyo propósito es animar, a cuantos más países como sea posible, a llevar a cabo un inventario de sus recursos y riesgos. Este sería un requisito imprescindible para establecer un sistema de información del terreno para mejorar o reestructurar el proceso de toma de decisiones, con el objetivo de alcanzar un desarrollo sostenible, especialmente en ciudades en crecimiento.

En este esquema metodológico, una parte extremadamente importante es la obtención de la información de partida y la implementación de la misma en el SIG. Las características y calidad de la información, así como su posterior implementación en el SIG, pueden determinar las metodologías a utilizar para el análisis de evaluación de tierras y, como consecuencia, influenciar la calidad final de los modelos de georrecursos y georriesgos. Por lo tanto, la selección de metodologías para la evaluación de tierras debe tener en cuenta diversos factores como, por ejemplo, la disponibilidad y calidad de la información necesaria para su desarrollo, su adecuación a la zona de estudio, la disponibilidad de información proveniente de trabajo de campo o la posibilidad de llevar a cabo una campaña de trabajo de campo para la elaboración o validación de los modelos y, por último, el objetivo final de los modelos. En el caso de nuestro esquema metodológico, ese objetivo es servir como mapas-criterio en el análisis de idoneidad o capacidad del terreno para acoger un determinado uso del suelo.

En general, las metodologías cuantitativas implican un menor grado de subjetividad y aseguran que los mismos resultados puedan ser alcanzados por diferentes investigadores, siempre y

cuando sean aceptadas las mismas asunciones básicas. Sin embargo, no existen procedimientos completamente objetivos y, en algunas ocasiones, las aproximaciones cualitativas son más flexibles y permiten una mayor incorporación del conocimiento experto. Ambos tipos de metodologías presentan ventajas e inconvenientes, por lo que, la elección de unas u otras debe basarse en los factores mencionados con anterioridad.

Los SDSS combinan las posibilidades de los SIG y las herramientas de apoyo a la toma de decisiones, metodologías de evaluación multicriterio. Estos sistemas espaciales de apoyo a la toma de decisiones han supuesto una considerable ayuda en los esfuerzos por resolver los diversos conflictos sobre los usos del suelo que comúnmente aparecen en cualquier proceso de ordenación sostenible del territorio. Las metodologías de evaluación multicriterio han sido duramente criticadas por su subjetividad. Sin embargo, es importante no olvidar que las decisiones sobre los usos del suelo son tomadas por agentes que son los que finalmente deben decidir entre diferentes usos, por lo que, el proceso de toma de decisiones siempre tendrá una parte importante de subjetividad. Las metodologías de evaluación multicriterio han hecho un gran esfuerzo por introducir tanta objetividad como es posible en un proceso altamente subjetivo.

La cartografía de localización óptima de nuevas instalaciones industriales desarrollada mediante la integración de las metodologías SAW y AHP en SIG es de gran utilidad para la ordenación de los usos del suelo en los alrededores de Zaragoza. Existe un beneficio adicional alcanzado mediante la integración de aspectos geocientíficos en el proceso de toma de decisiones sobre los usos del suelo de esta ciudad, tal y como es demandado por la Agenda 21.

La mayor desventaja de los métodos SAW utilizados, es que tienden a tener escasos fundamentos teóricos. Sin embargo, como son metodologías fáciles de usar, han sido ampliamente utilizadas en la vida real.

Un problema fundamental en la teoría de la decisión es como asignar pesos a un conjunto de criterios de acuerdo con su importancia. El AHP es un excelente y ampliamente conocido método para la evaluación de tierras. Sin embargo, una desventaja del mismo es la inherente subjetividad de la asignación de valores de preferencia entre criterios. Además, los pesos derivados de estos valores de preferencia tienen un gran efecto en los resultados obtenidos en el análisis de idoneidad del terreno para un determinado uso del suelo. Sin embargo, tal y como he mencionado con anterioridad, no debemos olvidar que las decisiones sobre los usos del suelo son tomadas normalmente por agentes, implicando una gran subjetividad. Una posible solución al problema podría venir por el establecimiento de valores de preferencia entre criterios por diferentes agentes de la decisión, de manera que se creasen diferentes cartografías de localización óptima de un determinado uso del suelo, para, finalmente, combinar todas y seleccionar la mejor localización desde todos los puntos de vista.

Además, no hay que olvidar que para evitar la inconsistencia a la hora de asignar valores de preferencia, Saaty (1977) creó un índice numérico (ratio de consistencia) para comprobar la consistencia de la matriz de comparación de pares de criterios.

Lamelas Gracia, M. T. (2009): "Esquema metodológico para la toma de decisiones sobre el uso sostenible del suelo: Aplicación a la localización de suelo industrial", *GeoFocus (Artículos)*, nº 9, p. 28-66. ISSN: 1578-5157

Agradecimientos

Esta investigación ha sido posible gracias a la subvención del Servicio de Investigación Alemán (DFG, Ho 804/7-1+2) y a la colaboración del Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio de la Universidad de Zaragoza. Es necesario dar las gracias a los directores y principal colaborador de este trabajo, Prof. Dr. Andreas Hoppe, Dr. Juan de la Riva y Oswald Marinoni por sus aportaciones en la investigación. Nos gustaría dar las gracias a la Confederación Hidrográfica del Ebro, el Gobierno de Aragón, el Ayuntamiento de Zaragoza, por la información que nos proporcionaron y en especial a los técnicos de dichas Instituciones que colaboraron en la selección de criterios y asignación de pesos de los mismos. Finalmente, agradecer los comentarios y sugerencias de los revisores del artículo que han incrementado la calidad del mismo.

Referencias bibliográficas

- Amadio, V., Amadei, M., Bagnaia, R., Di Bucci, D., Laureti, L., Lisi, A., Luger, F.R., Luger, N. (2002): "The role of geomorphology in Landscape Ecology: the Landscape Unit Map of Italy, Scale 1:250,000 (Carta Della Natura Project)", en. Allison, R.J. (Ed): *Applied Geomorphology: Theory and Practice*. Ltd, Chichester, John Wiley and Sons.
- Ballard, K.R. y khun, R.G. (1996): "Developing and testing a facility location model for Canadian nuclear fuel waste", *Risk analysis*, 16 (6), pp.821-832.
- Banai, R. (1993): "Fuzziness in geographical information systems: contributions from the analytic hierarchy process", *International Journal Geographical Information Systems*, 7(4), pp. 315-329.
- Banai-kashani, R. (1989): "A new method for site suitability analysis: the analytical hierarchy process", *Environmental management*, 13, pp. 685-693.
- Barredo, J. y Bosque, J. (1995): "Integración de evaluación multicriterio y sistemas de información geográfica para la evaluación de la capacidad de acogida del territorio y la asignación de usos del suelo". *Actas del IV Congreso Español de Sistemas de Información Geográfica*, Barcelona, 1995. AESIG. Pp. 191-200.
- Beguiría, S. y Lorente, A. (2003): *Landslide hazard mapping by multivariate statistics: comparison of methods and case study in the Spanish Pyrenees*. Madrid, Contract No EVG1 - CT-1999-00007, Instituto Pirenaico de Ecología.
- Benito, G., Pérez-Gonzalez, A., Gutiérrez-Santolalla, F. y Machado, M.J. (1998): "River response to Quaternary subsidence due to evaporite solution (Gállego River, Ebro Basin, Spain)", *Geomorphology*, 22, pp. 243-263.
- Bosque, J. (1997): *Sistemas de Información Geográfica*. Madrid, Ediciones RIALP.
- Bosque, J., Diaz, M.A., Gómez, M., Rodríguez, V.M., Rodríguez, A.E. y Vela, A. (1999): "Un rocedimiento basado en un SIG, para localizar centros de tratamiento de residuos", *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 9, pp. 295-323.
- Brans, J.P., Vincke, P. y Mareschal, B. (1986): "How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method", *European Journal of Operational Research*, 24, pp. 228-238.
- Can, A. (1993): "Residential quality assessment, Alternative approaches using GIS", en Fischer, M. y Nijkamp, P. (Eds): *Geographic information systems, spatial modelling and policy evaluation*. Berlín, Springer-Verlang.
- Carver, S.J. (1991): "Integrating multi-criteria evaluation with geographical information systems", *International Journal of Geographical Information Systems*, 5, pp. 321-339.

Lamelas Gracia, M. T. (2009): "Esquema metodológico para la toma de decisiones sobre el uso sostenible del suelo: Aplicación a la localización de suelo industrial", *GeoFocus (Artículos)*, nº 9, p. 28-66. ISSN: 1578-5157

- Carver, S.J. (1999): "Developing Web-based GIS/MCE: Improving access to data and spatial decision support tools", en Thill, J.C. (Ed): *Multicriteria decision-making and analysis: A geographic information science approach*. New York, Ashgate, pp. 49-76.
- Chester, D.K. (2002): "Overview: Hazards and Risks", en Allison, R.J. (Ed): *Applied Geomorphology: Theory and Practice*. Ltd, Chichester, John Wiley and Sons.
- Collins, M.G., Steiner, F.R. y Rushman, M. (2001): "Land-use suitability analysis in the United States: Historical development and promising technological achievements", *Environmental Management*, 28, pp. 611-621.
- Cox, C. y Madramootoo, C. (1998): "Application of geographic information systems in watershed management planning in St. Lucia", *Computers and Electronics in Agriculture*, 20, pp. 229-250.
- de la Rosa, D. y Magaldi, D. (1982): *Rasgos metodológicos de un sistema de evaluación de tierras para regiones mediterráneas*. Madrid, Report, Sociedad Española de Ciencias del Suelo.
- C.S.I.C. (1996): *Microleis 4.1: Exploring the Agro-ecological Limits of Sustainability. Pro&Eco. Agro-ecological Land Quality Evaluation System*. Sevilla. Report, Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología.
- de la Rosa, D., Mayol, F., Moreno, F., Cabrera, F., Díaz-Pereira, E. y Antoine, J. (2002): "A multilingual soil profile database (SDBm Plus) as an essential part of land resources information Systems", *Environmental modelling & Software*, 17, pp. 721-730.
- de la Rosa, D., Mayol, F., Díaz-Pereira, E., Fernández, M. y de la Rosa Jr, D. (2004): "A land evaluation decision support system (MicroLEIS DSS) for agricultural soil protection with especial reference to the Mediterranean region", *Environmental modelling & Software*, 19, pp. 929-942.
- Eastman, J.R. (1997): *IDRISI for Windows, Version 2.0: Tutorial exercises*. Graduated School of Geography. Clark University, Worcester.
- Eastman, J.R., Kyem, P.A., Toledano, J. y Jin, W. (1993): *Gis and Decision Making*. United Nations institute for Training and Research, Ginebra.
- Erkurt, E. y Moran, S.R. (1991): "Locating obnoxious facilities in the public sector: an application on the analytic hierarchy process to municipal landfill siting decisions", *Socio-economic planning*, 25 (2), pp. 89-102.
- ESRI Inc. (2005): *ArcGIS 9.1*. Redlands, California, ESRI Inc.
- Gao, Y. y Alexander, E.C. (2003): "A mathematical model for a sinkhole probability map in Fillmore county, Minnesota", en Beck, B.F. (Ed): *Proceedings of 9th multidisciplinary conference on sinkholes and the engineering and environmental impacts of karsts*. Huntsville, Alabama, ASCE Geotechnical Special Publication, pp. 439-449.
- Gilliams, S., Raymaekers, D., Muys, B. y van Orshoven, J. (2005): "Comparing multiple criteria decision methods to extend a geographical information system on afforestation", *Computers and Electronics in Agriculture*, 49, pp. 142-158.
- Gilpin, A. (2000): *Environmental Economics. A critical overview*. Ltd., Chichester, John Wiley & sons.
- Gómez-Delgado, M. y Barredo, J.I. (2005): *Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*. Paracuellos de Jarama, RA-MA Editorial.
- Goodchild, M.F. (2003): "Geographic Information Science and Systems for Environmental Management", en Matson, P., Gadgil, A y Kammen, D.M. (Eds): *Annual Review of Environment and Resources*. Palo Alto, pp. 493-519.

Lamelas Gracia, M. T. (2009): "Esquema metodológico para la toma de decisiones sobre el uso sostenible del suelo: Aplicación a la localización de suelo industrial", *GeoFocus (Artículos)*, nº 9, p. 28-66. ISSN: 1578-5157

- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M. y Reichenbach, P. (1999): "Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy", *Geomorphology*, 31, pp. 181-216.
- Heywood, I., Cornelius, S., Carver, S. (2002): *An introduction to geographical information Systems*, Harlow, Prentice Hall.
- Höltling, B., Haertlé, T., Hohberger, K.-H., Nachtigall, K.H., Villinger, E., Weinzierl, W., Wrobel, J.-P. (1995): "Konzept zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung. Geologisches", *Jahrbuch, reihe C*, 63, pp. 5-24.
- Hopkins, L.D. (1977): "Methods for generating land suitability: a comparative evaluation", *Journal of American Institute of Planners*, 43, pp. 387-401.
- Hoppe, A. (2002): "Georessourcen und Georisiken", *Schriftenreihe der Deutschen Geologischen Gesellschaft*, 15, pp. 157-172.
- Hoppe, A., Lang, S., Lerch, C. y Marinoni, O. (2006): "Geology and a spatial decision support system for the surroundings of urban areas: An example from southern Hesse (Germany)", *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 157, pp. 135-146.
- Hwang, C.L. y Yoon, K. (1981): *Multiple attribute decision making: methods and application*. Berlin, Heidelberg, New York, Springer.
- Janssen, R. y Rietveld, P. (1990): "Multicriteria analysis and GIS: "An Application to Agricultural Land-use in the Netherlands", en Scholten, H y Stillwell, J. (Eds): *Geographical Information Systems for Urban and Regional Planning*. Dordrecht, Kluwer.
- Jankowski, P. (1995): "Integrating geographical information systems and multiple criteria decision-making", *International Journal of Geographical Information Systems*, 9, pp. 251-273.
- Lamelas, M.T. (2007): *Geo-resources and geo-hazards in the context of a sustainable development in the periphery of urban areas, exemplary of a part of the Ebro Basin in the surroundings of Zaragoza (Spain)*. Darmstadt, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, pp. 211. Available on <http://elib.tu-darmstadt.de/diss/000794>, last accessed June, 2008.
- Lamelas, M.T., Marinoni, O., Hoppe, A. y de la Riva, J. (2006a): "Sustainable land-use management with the help of spatial decision support systems: An example of a covered karst area in the surroundings of Zaragoza (Spain)", *All about Karst & Water*, Vienna, pp. 9.
- Lamelas, M.T., Marinoni, O., de la Riva, J. y Hoppe, A. (2006b): "The use of Spatial Decision Support Systems for sand and gravel extraction suitability in the context of a sustainable development in the surroundings of Zaragoza (Spain)", en *Proceedings of the 5th European Congress on Regional Geoscientific Cartography and Information Systems*. Barcelona, Instituto Cartográfico de Cataluña, pp. 180-183.
- Lamelas, M.T., Marinoni, O., Hoppe, A. y de la Riva, J. (2007a): "Groundwater vulnerability map for the Ebro alluvial aquifer between Jalón and Ginel tributaries (Spain)", *Environmental Geology*, 53(4), pp. 861-878. DOI 10.1007/s00254-007-0699-5.
- Lamelas, M.T., Marinoni, O., Hoppe, A. y de la Riva, J. (2008a): "Dolines probability map using logistic regression and GIS technology in the central Ebro Basin (Spain)", *Environmental Geology*, 54(5), pp. 963-977. DOI 10.1007/s00254-007-0895-3.
- Lamelas, M.T., Marinoni, O., Hoppe, A. y de la Riva, J. (2008b): "Suitability analysis for sand and gravel extraction site location in the context of a sustainable development in the surroundings of Zaragoza (Spain)", *Environmental Geology*, 55(8), pp. 1673-1686. DOI 10.1007/s00254-007-1116-9.

Lamelas Gracia, M. T. (2009): "Esquema metodológico para la toma de decisiones sobre el uso sostenible del suelo: Aplicación a la localización de suelo industrial", *GeoFocus (Artículos)*, nº 9, p. 28-66. ISSN: 1578-5157

- Lamelas, M.T., Marinoni, O., Hoppe, A. y de la Riva, J. (2008c): "Modelling environmental variables for geohazards and georesources assessment to support sustainable land-use decisions in Zaragoza (Spain)", *Geomorphology* (in press).
- McGranahan, G. y Satterthwaite, D. (2003): "Urban centers: An assessment of Sustainability", en Matson, P., Gadgil, A. y Kammen, D.M. (Ed): *Annual Review of Environment and Resources. Annual Reviews*. Palo Alto, pp. 243-274.
- Malczewski, J. (1996): "A GIS-based approach to multiple criteria group decision-making", *International Journal of Geographical Information Systems*, 10(8), pp. 955-971.
- Malczewski, J. (1999): *GIS and multicriteria decision analysis*. New York, Wiley.
- Malczewski, J. (2000): "On the use of weighted linear combination method in raster GIS: common and best practice approaches", *Trans GIS*, 4(1), pp.5-22.
- Malczewski, J. (2004): "GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview", *Progress in Planning*, 62, pp. 3-65.
- Malczewski, J. y Rinner, C. (2005): "Exploring multicriteria decision strategies in GIS with linguistic quantifiers: A case study of residential quality evaluation", *Journal of Geographical Systems*, 7, pp. 249-268.
- Malczewski, J., Moreno-Sánchez, R., Bojorquez-Tapia, L.A. y Ongay-Delhumeau, E. (1997): "Environmental conflict analysis in the Cape Region, Mexico", *Journal of Environmental Planning and Management*, 40 (3), pp. 349-374.
- Marinoni, O. (2004): "Implementation of the analytical hierarchy process with VBA in ArcGIS", *Computers and Geosciences*, 30, pp. 637-646.
- Marinoni, O. (2005): "A stochastic spatial decision support system based on PROMETHEE", *International Journal of Geographical Information Science*, 19(1), pp. 51-68.
- Marinoni, O. y Hoppe, A. (2006): "Using the Analytic Hierarchy Process to support the sustainable use of geo-resources in metropolitan areas", *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 15(2), pp. 154-164.
- Massam, B. (1991): "The location of waste transfer stations in Ashdod, Israel, using a multi-criteria decision support system", *Geoforum*, 22(1), pp.41-57.
- Miller, L., Collins, M.G., Steiner, F.R. y Cook, E. (1998): "An approach for greenway suitability analysis", *Landscape and Urban Planning*, 42, pp. 91-105.
- Mitlin, D. y Satterthwaite, D. (1996): "Sustainable Development and Cities", en Pugh, C. (Ed): *Sustainability, the Environment and Urbanization*. London, Earthscan publications Limited, pp. 23-64.
- Munasinghe, M. (1993): "Environmental economics and sustainable development", en Bank, W. (Ed): *World bank Environmental Paper Number 3*, Washington DC.
- Munasinghe, M. y Cruz, W. (1995): "Economy wide policies and the environment: Lessons for experience", en Bank, W. (Ed), *World Bank Environmental Paper Number 10*, Washington, DC.
- Ollero, A. (1996): *El curso medio del Ebro*, 4. Zaragoza, Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón.
- Pereira, J.M.C. y Duckstein, L. (1993): "A multiple criteria decision-making approach to GIS-based land suitability evaluation", *International Journal of Geographical Information Systems*, 7, pp. 407-424.
- Plate, E.J. y Merz, B. (2001): *Naturkatastrophen, Ursachen –Auswirkungen– Vorsorge*. Stuttgart, Schweizerbart.

Lamelas Gracia, M. T. (2009): “Esquema metodológico para la toma de decisiones sobre el uso sostenible del suelo: Aplicación a la localización de suelo industrial”, *GeoFocus (Artículos)*, n° 9, p. 28-66. ISSN: 1578-5157

- Pugh, C. (1996): *Sustainability, the environment and urbanization*. London, Earthscan Publications Ltd.
- Raju, K.S. y Pillai, C.R.S. (1999): “Multicriterion decision making in river basin planning and development”, *European Journal of Operational Research*, 112, pp. 249-257.
- Rinner, C (2003): “Web-based spatial decision support: status and research directions”, *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 7(1), pp. 14-31.
- Rinner, C. y Malczewski, J. (2002): “Web-enabled spatial decision analysis using ordered weighted averaging (OWA)”, *Journal of Geographical Systems*, 4 (4), pp. 385-403.
- Saaty, T.L. (1977): “A scaling method for priorities in hierarchical structures”, *Journal of Mathematical Psychology*, 15, pp. 231-281.
- Saaty, T.L. y Vargas, L.G. (1991): *Prediction, Projection and Forecasting*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.
- Thill, J.C. (1999): *Spatial Multicriteria Decision Making and Analysis. A geographic information science approach*. Aldershot, Ashgate.
- Vincke, P. (1986): “Analysis of multicriteria decision aid in Europe”, *European Journal of Operational Research*, 25, pp. 160-168.
- Voogd, H. (1983): *Multicriteria evaluation for urban and regional planning*. London, Pion Limited.
- Wallenius, J., Dyer, J.S., Fishburn, P.C., Steuer, R.E., Zionts, S. y Deb, K. (2008): “Multiple Criteria Decision Making, Multiattribute Utility Theory: Recent accomplishments and what lies ahead”, *Management Science*, 54 (7), pp. 1336-1349.
- WCED (1987): *Our common future. World Commission on Environment and Development*. Oxford, Oxford University Press.
- Wellmer, F.W. y Becker-Platen, J.D. (1999): *Mit der Erde leben – Beiträge Geologischer Dienste zur Daseinsvorsorge und nachhaltigen Entwicklung*. Berlin, Springer.
- Wellmer, F.W. y Becker-Platen, J.D. (2002): “Development and the exploitation of mineral and energy resources: a review”, *International Journal of Earth Sciences*, 91(5), pp. 723-745.
- Wischmeier, W.H. y Smith, D.D. (1978): *Predicting Rainfall Erosion Losses- A guide to conservation*. Washington, D.C.
- Zhu, X y Dale, A.P. (2001): “A Web-based decision analysis tool for natural resource and environmental management”, *Environmental Modelling & Software*, 16, pp. 251-262.

TABLAS

Tabla 1: Valores utilizados en la estandarización de la protección del agua subterránea.

Valor original	Valor estandarizado
0 – 500	1
500-1000	2
1000-2000	3
2000-4000	4
> 4000	5
Fuera del modelo	6

Tabla 2: Valores utilizados en la estandarización de la susceptibilidad al desarrollo de dolinas.

Valor original	Valor estandarizado
> 0.06	1
0.04-0.06	2
0.02-0.04	3
< 0.02	5
Fuera del modelo	6

Tabla 3: Valores utilizados en la estandarización del riesgo de inundación.

Valor original	Valor estandarizado
Periodo de retorno de 5 años	1
Periodo de retorno de 50 años	3
Periodo de retorno de 500 años	5
Fuera del modelo	6

Tabla 4: Valores utilizados en la estandarización de la capacidad agrícola de los suelos.

Valor original	Valor estandarizado
Áreas sin suelo	1
Moderada capacidad agrícola con la deficiencia climática como factor limitante	3
Moderada capacidad agrícola con la deficiencia climática y el suelo como factores limitantes	4
Moderada capacidad agrícola con la deficiencia climática, el suelo y la pendiente como factores limitantes	5
Capacidad agrícola marginal con el suelo como factor limitante	6

Tabla 5: Valores utilizados en la estandarización de la caracterización tectónica del subsuelo.

Valor original	Valor estandarizado
> 30 %	1
15-30 %	2
10-15 %	3
5-10 %	4
2-5 %	5
0-2 %,	6

Tabla 6: Valores utilizados en la estandarización de la caracterización tectónica de los suelos.

Valor original	Valor estandarizado
Llanura de inundación, río, laderas sobre materiales terciarios, zonas endorreicas, conos aluviales y valles de fondo plano	1
Terrazas bajas	3
Glacis y terrazas altas	6

Tabla 7. Escala de comparación de criterios

Valor de Importancia	Descripción
1	Igual importancia
3	Importancia moderada
5	Importancia fuerte o esencial
7	Importancia muy fuerte
9	Extrema importancia
2,4,6,8	Valores intermedios
Valores recíprocos	Valores para la comparación inversa

Fte. Elaboración propia a partir de Saaty y Vargas (1991).

Tabla 8. Matriz de preferencia y pesos asignados a los criterios.

Matriz de preferencia	A	B	C	D	E	F	G	Peso
A. Protección acuíferos	1,00	2,00	3,00	1,00	5,00	8,00	6,00	0,289
B. Desarrollo dolinas	0,50	1,00	2,00	0,50	3,00	7,00	4,00	0,174
C. Riesgo de inundación	0,33	0,50	1,00	0,33	2,00	6,00	3,00	0,113
D. Afección espacios naturales	1,00	2,00	3,00	1,00	5,00	8,00	6,00	0,289
E. Capacidad agrícola	0,20	0,33	0,50	0,20	1,00	4,00	2,00	0,067
F. Porcentaje de pendiente	0,13	0,14	0,17	0,13	0,25	1,00	0,50	0,025
G. Caracterización geotectónica	0,17	0,25	0,33	0,17	0,50	2,00	1,00	0,043

Tabla 9. Matriz de preferencia y pesos asignados a los criterios en el análisis de sensibilidad del modelo.

Matriz de preferencia	A	B	C	D	E	F	G	Peso
A. Protección acuíferos	1,00	0,25	0,33	2,00	5,00	0,33	0,33	0,073
B. Desarrollo dolinas	4,00	1,00	4,00	5,00	8,00	2,00	3,00	0,349
C. Riesgo de inundación	3,00	0,25	1,00	4,00	7,00	1,00	2,00	0,177
D. Afección espacios naturales	0,50	0,20	0,25	1,00	4,00	0,25	0,25	0,051
E. Capacidad agrícola	0,20	0,13	0,14	0,25	1,00	0,14	0,14	0,022
F. Porcentaje de pendiente	3,00	0,50	1,00	4,00	7,00	1,00	2,00	0,189
G. Caracterización geotectónica	3,00	0,33	0,50	4,00	7,00	0,50	1,00	0,138

Lamelas Gracia, M. T. (2009): "Esquema metodológico para la toma de decisiones sobre el uso sostenible del suelo: Aplicación a la localización de suelo industrial", *GeoFocus (Artículos)*, n° 9, p. 28-66. ISSN: 1578-5157

FIGURAS

Desarrollo Sostenible

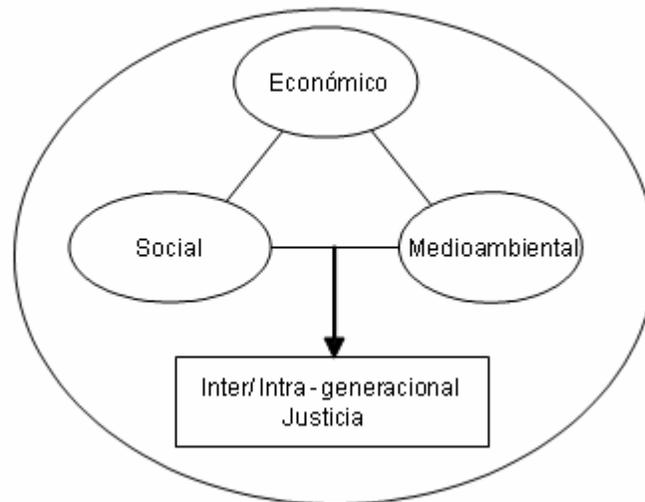


Figura 1. Componentes del desarrollo sostenible.

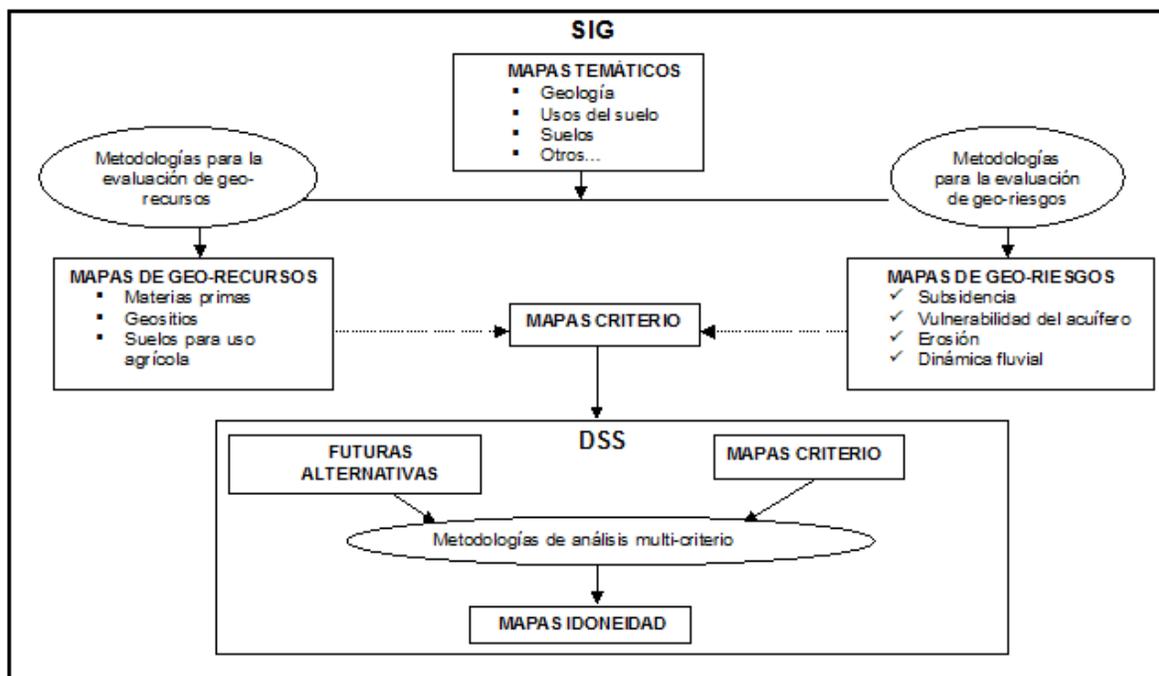


Figura 2: Esquema conceptual para el análisis de los usos del suelo (Spatial Decision Support System –SDSS- como la integración de Decision Support Systems –DSS- en un SIG).

Lamelas Gracia, M. T. (2009): “Esquema metodológico para la toma de decisiones sobre el uso sostenible del suelo: Aplicación a la localización de suelo industrial”, *GeoFocus (Artículos)*, nº 9, p. 28-66. ISSN: 1578-5157

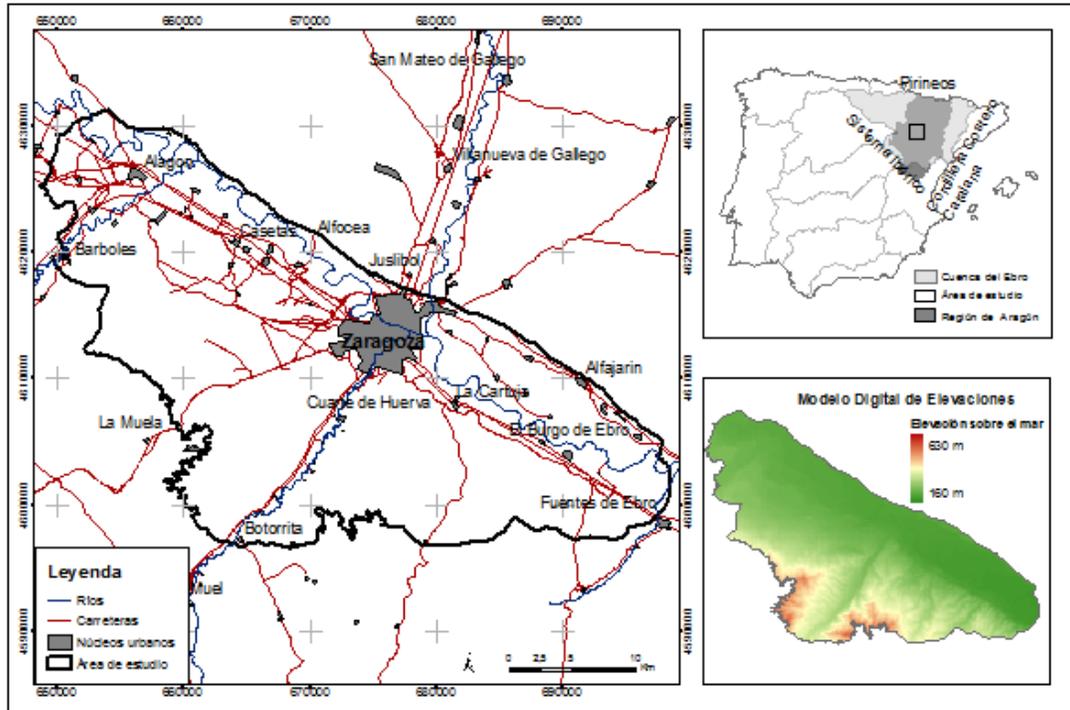


Figura 3: Localización del área de estudio.

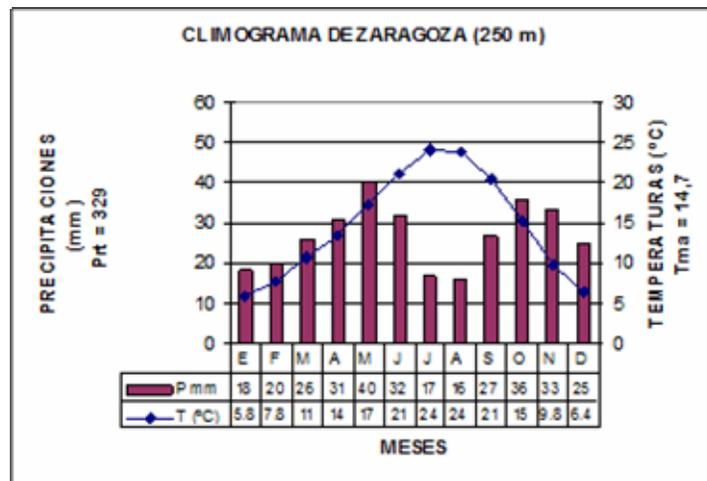


Figura 4: Climograma de Zaragoza. Fuente: Gobierno de Aragón.

Lamelas Gracia, M. T. (2009): "Esquema metodológico para la toma de decisiones sobre el uso sostenible del suelo: Aplicación a la localización de suelo industrial", *GeoFocus (Artículos)*, nº 9, p. 28-66. ISSN: 1578-5157

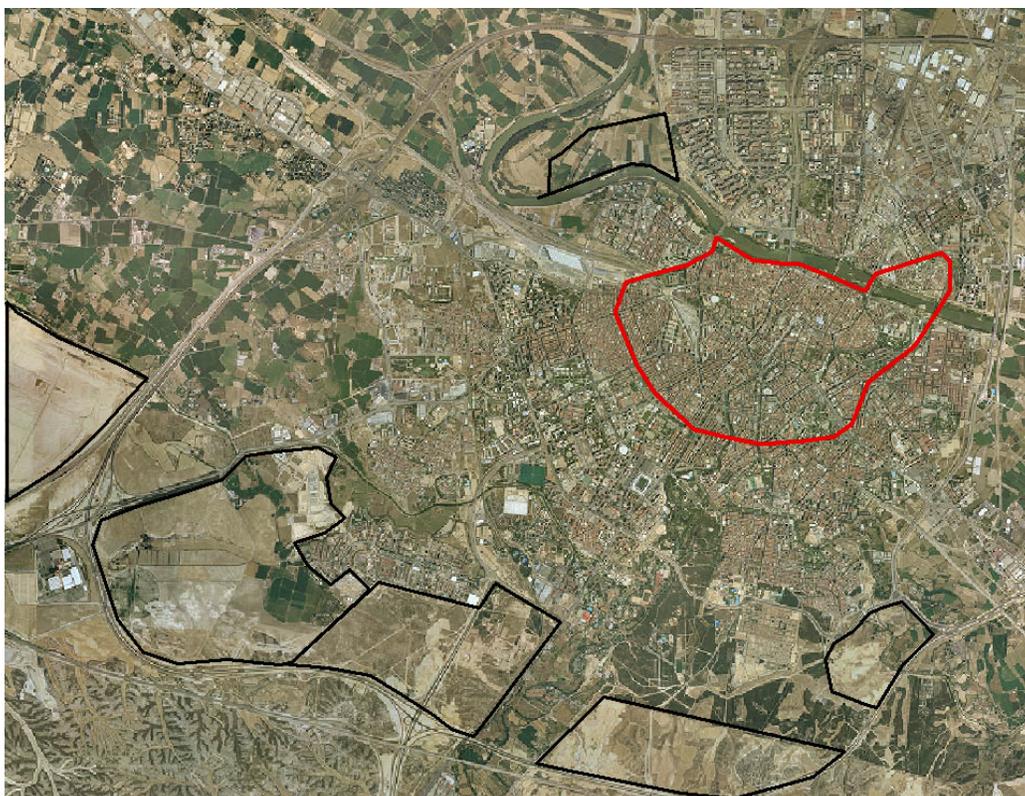


Figura 5: Ortoimagen de Zaragoza, 2004. Fuente: Ayuntamiento de Zaragoza. En color rojo está delineada la extensión aproximada de Zaragoza en 1927. Las zonas actualmente en construcción están marcadas en negro.

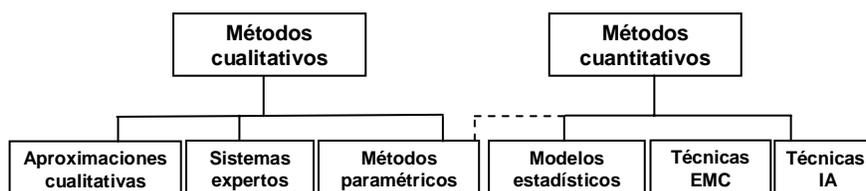


Figura 6: Metodologías para la evaluación de tierras.

Lamelas Gracia, M. T. (2009): "Esquema metodológico para la toma de decisiones sobre el uso sostenible del suelo: Aplicación a la localización de suelo industrial", *GeoFocus (Artículos)*, nº 9, p. 28-66. ISSN: 1578-5157

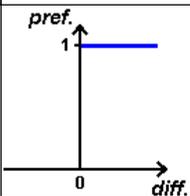
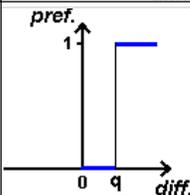
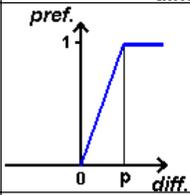
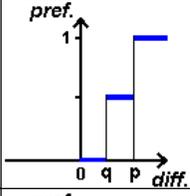
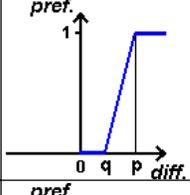
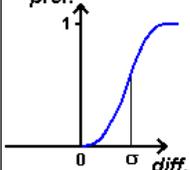
Type of generalized criterion	Analytical definition	Shape	Parameters to define
Usual criterion	$H(d) = 0$ if $d = 0$ $H(d) = 1$ if $d > 0$		
Quasi-criterion	$H(d) = 0$ if $d \leq q$ $H(d) = 1$ if $d > q$		q
Criterion with linear preference	$H(d) = d/p$ if $d \leq p$ $H(d) = 1$ if $d > p$		p
Level-criterion	$H(d) = 0$ if $d \leq q$ $H(d) = 1/2$ if $q < d \leq p$ $H(d) = 1$ if $d > p$		q,p
Criterion with linear preference and indifference area	$H(d) = 0$ if $d \leq q$ $H(d) = (d-q)/(p-q)$ if $q < d \leq p$ $H(d) = 1$ if $d > p$		q,p
Gaussian-criterion	$H(d) = 1 - \exp(-d^2 / 2\sigma^2)$		σ

Figura 7: Funciones de generalización (modificado a partir de Brans *et al.*, 1984).

Lamelas Gracia, M. T. (2009): "Esquema metodológico para la toma de decisiones sobre el uso sostenible del suelo: Aplicación a la localización de suelo industrial", *GeoFocus (Artículos)*, nº 9, p. 28-66. ISSN: 1578-5157

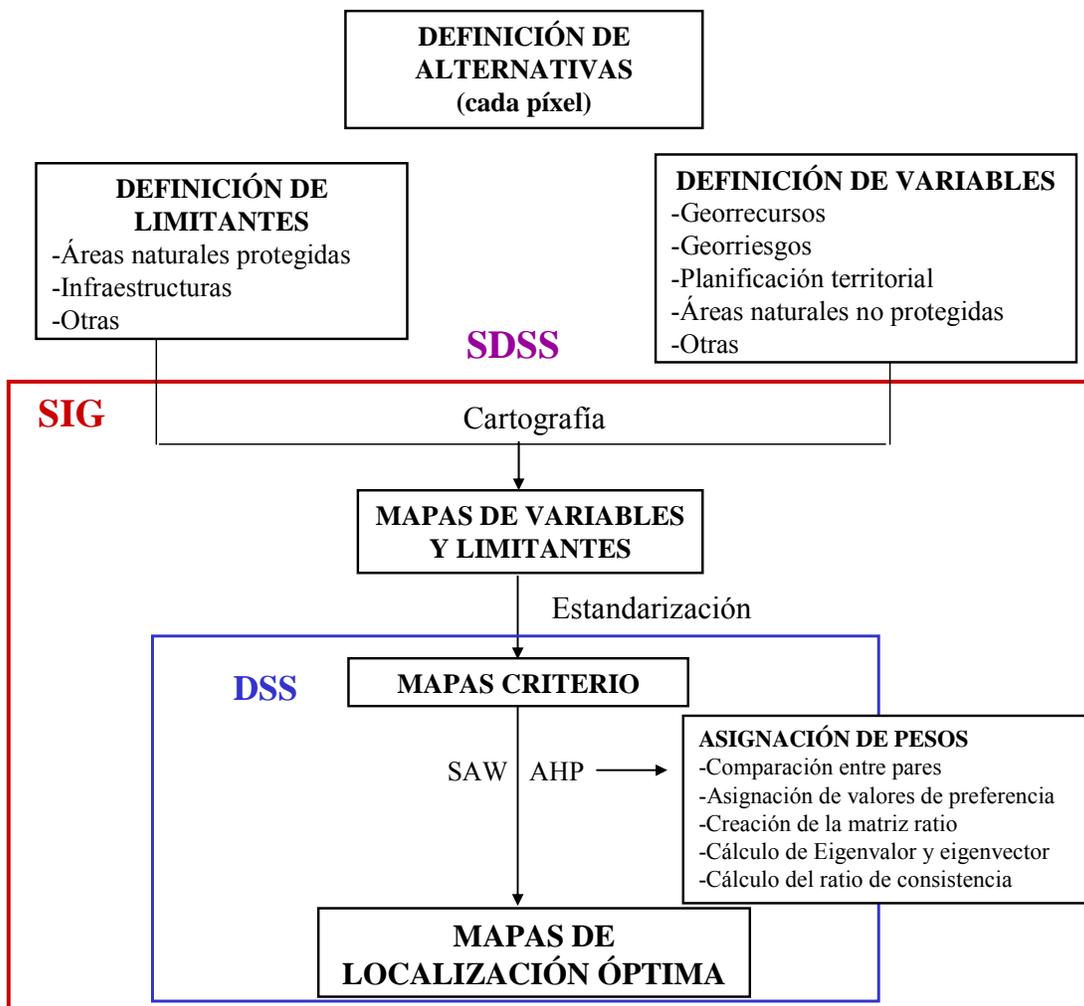


Figura 8: Pasos a seguir para el análisis de localización óptima de un determinado uso.

Lamelas Gracia, M. T. (2009): "Esquema metodológico para la toma de decisiones sobre el uso sostenible del suelo: Aplicación a la localización de suelo industrial", *GeoFocus (Artículos)*, nº 9, p. 28-66. ISSN: 1578-5157

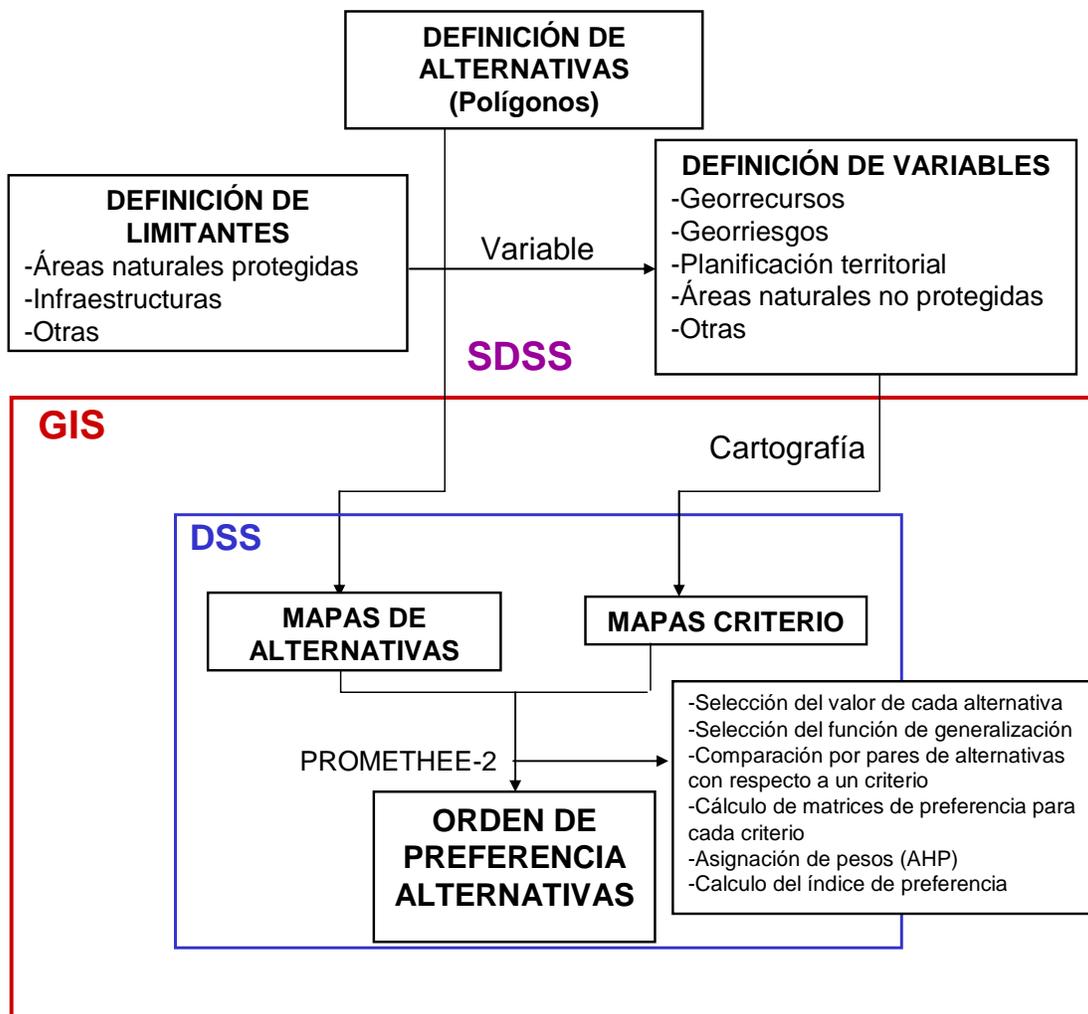


Figura 9: Pasos a seguir para el análisis de selección de alternativas para un determinado uso.

Lamelas Gracia, M. T. (2009): “Esquema metodológico para la toma de decisiones sobre el uso sostenible del suelo: Aplicación a la localización de suelo industrial”, *GeoFocus (Artículos)*, nº 9, p. 28-66. ISSN: 1578-5157

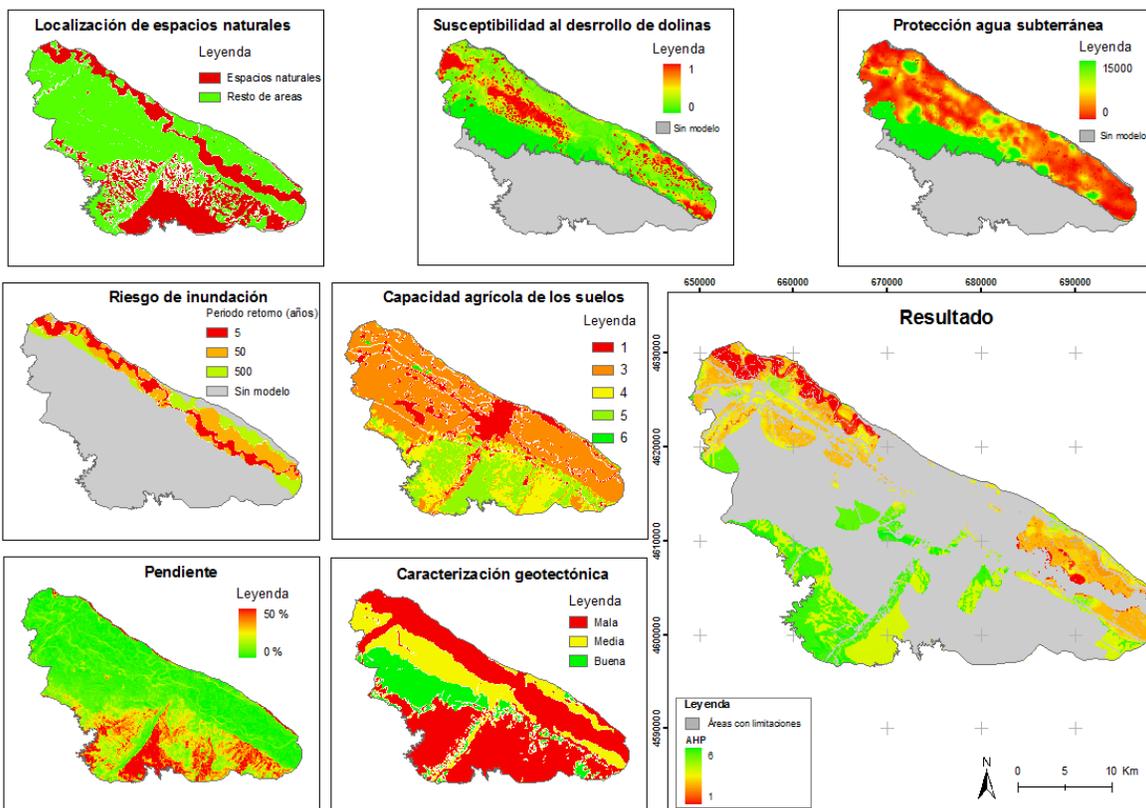


Figura 10: Mapa resultado del análisis de idoneidad para la localización industrial óptima y valores originales modelos AHP.

Lamelas Gracia, M. T. (2009): "Esquema metodológico para la toma de decisiones sobre el uso sostenible del suelo: Aplicación a la localización de suelo industrial", *GeoFocus (Artículos)*, n° 9, p. 28-66. ISSN: 1578-5157

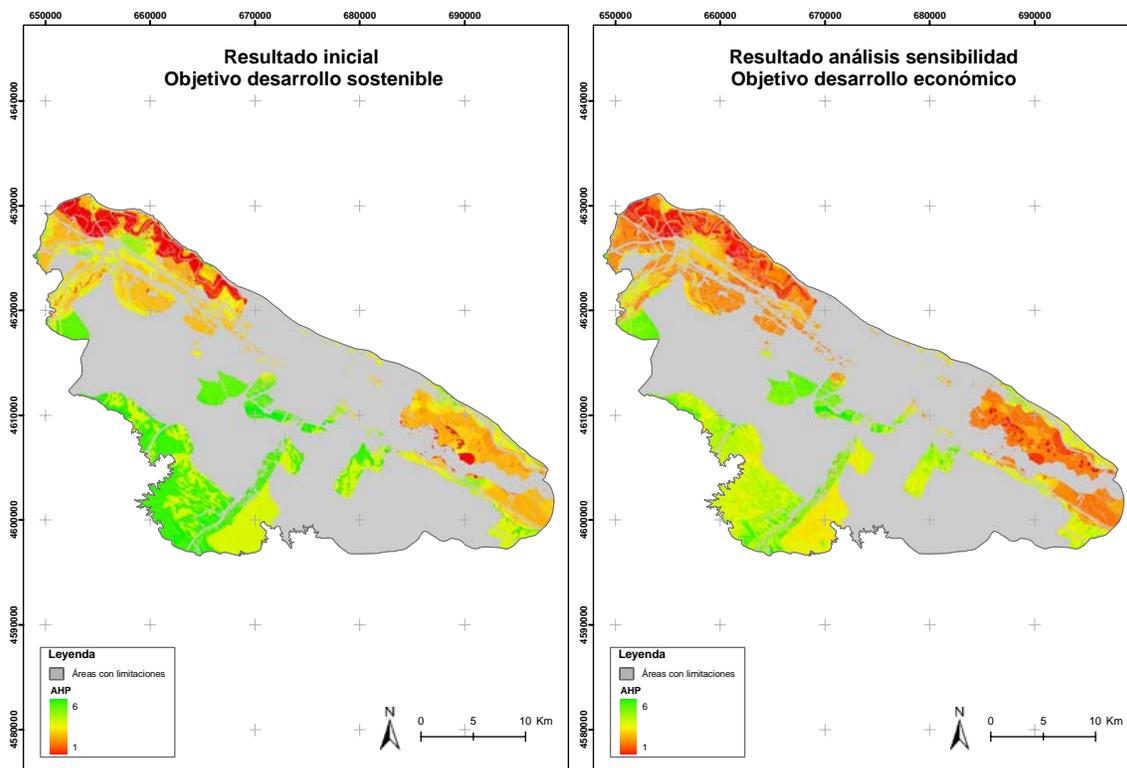


Figura 11: Comparación de resultados entre el modelo inicial y el análisis de sensibilidad.