

Hernández-Durán, G., Arranz-González, J. C. y Vega-Panizo, R. de la. 2014. El análisis del potencial geológico de rocas industriales en proyectos de planificación territorial: una revisión. *Boletín Geológico y Minero*, 125 (4): 475-492  
ISSN: 0366-0176

# El análisis del potencial geológico de rocas industriales en proyectos de planificación territorial: una revisión

G. Hernández-Durán<sup>(1)</sup>, J. C. Arranz-González<sup>(2)</sup> y R. de la Vega-Panizo<sup>(3)</sup>

(1) INTERRA, Ingeniería y recursos. Santo Domingo, 2, 38003, Sta. Cruz de Tenerife, España.  
german@interra.es

(2) Departamento de Investigación en Recursos Geológicos, Instituto Geológico y Minero de España.  
Ríos Rosas, 23, 28003 Madrid, España.  
jc.arranz@igme.es

(3) ETS de Ingenieros de Minas y Energía, Universidad Politécnica de Madrid.  
Alenza, 4 28003 Madrid, España  
rogelio.delavega@upm.es

## RESUMEN

Indudablemente, la extracción de recursos minerales entra en conflicto con otros usos del territorio. La planificación territorial puede evitar estos conflictos, minimizar los impactos acumulativos adversos de la minería y prevenir la disminución de recursos disponibles. Esto es especialmente cierto en lo referente a minerales industriales. El conocimiento de la distribución territorial de los recursos potenciales es la clave para alcanzar la integración efectiva de la minería en la planificación, y la mejor forma posible para salvaguardar los minerales frente a actividades que pueden comprometer su disponibilidad futura. Tanto en proyectos de ordenación minero-ambiental como en mapas de salvaguardia, los recursos minerales se han definido normalmente mediante el análisis de la información geológica cuando la escala no es detallada. Pero cuando se alcanzan escalas locales o municipales (mapas de gran escala), la planificación demanda más información para una mejor delimitación de los recursos. Esto puede requerir la recolección de datos de campo, la búsqueda de informes y documentos publicados, el inventario y la caracterización de explotaciones, y la consulta con la industria.

El objetivo principal de este estudio es revisar varios trabajos de ordenación minera y ambiental, de cara a obtener un mejor conocimiento de las diferentes fórmulas y criterios utilizados para delimitar los recursos de rocas industriales presentes en un área. Se concluye que no existe una manera universal para abordar esta cuestión, y que una infraestructura de conocimiento geológico detallado es crucial para la planificación territorial de estos recursos minerales, en especial a escalas locales o municipales.

Palabras clave: planificación territorial, potencial geológico, rocas industriales.

## ***The analysis of the geological potential for industrial rocks in land-use planning projects: a review***

### ABSTRACT

*There is no doubt that mineral resource extraction conflicts with other land uses. Spatial planning may avoid conflicts regarding land use, reduce adverse cumulative impacts of mining and prevent depletion of available mineral resources. This is especially true with industrial minerals. Knowing the distribution of potential mineral resources in the territory is the key to achieving the effective integration of mining in land-use planning, and thus safeguard in the best possible way mineral resources from the activities that may compromise their future availability. In both environmental-mining projects and mineral safeguarding mapping, potential geo-mine resources have been normally delimited by analysing geological information and maps, when the scale of work is not detailed (regional planning). But when it comes to the local or municipal scale (large-scale mapping), planning requires far more data for a better delimitation of mineral*

resources. This may require field data collection, the revision of published reports and papers, the inventory and characterization of mines and quarries, and consultation with industry.

The main aim of this study is to review several studies focused on mining and environmental planning, in order to obtain a better knowledge of the different formulae and criteria used to define industrial rocks resources which are present in a certain area. We conclude that there is no universal way to address this issue and also highlight that a detailed infrastructure of geologic knowledge is crucial for the planning applied to these types of mineral resources, especially at a local or municipal level.

Key words: geologic potential, industrial rocks, land-use planning.

#### ABRIDGED ENGLISH VERSION

### **Introduction and methods**

It is evident that mining is increasingly in conflict with other land uses (eg: Lüttig, 1987a, 1990; Bauer, 1993; Langer, 2002; Langer et al., 2002; Baretino et al., 2003; García Cortés et al., 2006; Luaces Frades and Gómez Sánchez, 2009). However, it is also true that this reality has changed with the progressive development of regulations for reclamation/remediation applied to mining projects. Land-use planning can avoid this type of conflict and can also reduce the adverse cumulative impact of mining and reduce sterilization of resources. Baretino (2002) emphasized that spatial planning applied to mining activity is logically more suitable for those mineral resources that have a wide geographical distribution, such as industrial rocks (Bates, 1969). Generally, planning work focused on mining seeks to evaluate the potential mineral resources and the environmental fragility of the territory, in order to establish the zones where mining impact may be acceptable or reversible. The effective integration of mining in spatial planning requires the geographical delimitation of areas of land that house mineral resources and assessing their quantity and quality (Baretino et al., 2003). Moreover, there is a need to consider mineral resources as part of land management plans to avoid unnecessary restrictions in areas with high geologic potential, whilst protecting valuable surface resources. Authors such as Chambers (1985), Lüttig (1990), Stenestad and Sustrac (1994), and Langer (2002) call attention to this point, presenting it as another concern added to social rejection or competition for land use. The main aim of this paper is to review several studies focused on mining and environmental planning, in order to obtain a better knowledge of the different formulae and criteria used to delimitate the industrial mineral resources present in a certain area.

### **Results and discussion**

One way to try to integrate mineral resources in planning is to define mineral safeguarding areas. A mineral safeguarding area is a designation of land intended to protect mineral resources against unnecessary sterilization. These areas are mapped using the best available geological information and through consultation with the industry (McEvoy et al., 2007; Wrighton et al., 2011). The mapping of mineral resources and the recognition of safeguarding areas for potentially exploitable resources can be valuable tools as a starting point for the integration of mineral resources in the territorial planning process. However, there are other important variables that should be considered to select the most appropriate location. There are several methods of work that, together with the study of the distribution of geological resources, try to analyze other important environmental variables.

Amongst the first spatial planning studies that analyzed the potential of geological resources are geoscientific sets of maps of the natural environment potential (GMNEP), (Lüttig, 1982, 1987), at 1:200 000 scale. These were later developed at more detailed scales 1:50 000 and 1:25 000 (Lüttig, 1987; Becker-Platen et al., 1987; Mattig, 1992). The ultimate goal is to obtain synthetic geoscientific maps, showing areas with different priorities for different land uses, including the extraction of mineral raw materials. In Spain, the first geoscientific maps have been developed since 1975, by a team from the Department of Geology at the University of Cantabria, at 1:50 000 scale (Cendrero, 1975; Cendrero and Díaz de Terán 1987). The mapping of mineral resources in these types of geoscientific studies is an interpretation/translation of geological mapping, with the support and recognition of the mining activity.

The Austrian Geological Survey developed a method to identify, characterize, and to evaluate the "protectivity" of aggregate resources, for land-use planning purposes at 1:20 000 scale. The model identified conservation zones for further exploitation and evaluation of resources, and non-conservation zones where development should be restricted or forbidden. The recognition and evaluation of mineral resources was based on existing geological mapping and a set of detailed information about the extraction of aggregates in the region,

taking into account aggregate quality and quantity, as well as the potential for unwanted impact to the environment.

The above examples can be considered as precursors to some methods in which the determination of the carrying capacity of the territory is done through a balance between vulnerability, fragility or environmental sensitivity to mining, and considering the potential for the development of this activity (eg.: Baretino et al., 1994; IGME, 1995; Sánchez and Cárdenas, 2001; Martínez-Plédel et al., 2006; INTERRA, 2007; Arranz-González and Alberruche del Campo, 2009). In the 1990s, the Geological and Mining Institute of Spain (IGME), developed a line of work called Mining-Environmental Planning of mineral resources, whose main objective is to obtain Mining-Environmental Planning Maps (Fig 1). The aforementioned maps show areas with different categories of exploitable resources and environmental protection zones in which mining is not recommended and exploitable areas with different levels of priority.

The pioneering work in this line was the Study of Mining and Environmental Planning for ornamental slate resources in La Cabrera (León), whose objective was to obtain the "Mining-Environmental Planning Map" at 1:25 000 (Baretino et al., 1994; IGME, 1995; Baretino, 2002). The aptitude (potential for slate mining) of the territory was defined from the following components: exploitable resources (RECU), that qualitatively assesses the quantity and quality of existing slate resources; exploitability (EXPL) or assessment of the characteristics of the rock mass and their status for slate exploitation; altitude (ALTI) and slope (PEN), which are determining factors regarding the optimization of the mining profit, and regarding the location of spoil heaps. The method developed by the IGME has inspired several planning projects conducted in Ecuador (Loayza and Carrión, 2003; Ladines and Carrión, 2007).

Other studies that represent methodological variants for mining and environmental planning are: the technical document that provides the basis for the Special Plan for Extractive Activities for Granadilla de Abona (Hernández-Durán, 2000), the doctoral thesis of Colegio-Gutiérrez (2004) dedicated to the existing resources in the basin of the Jarama River (Madrid), or the Mining and Environmental Planning Project for the sector of natural aggregates in the Ribera del Ebro (Navarra) (IGME, 2009; Arranz González et al., 2009). They make use of the concept of aptitude. An example of an aptitude map of mineral resources is shown in Figure 2.

Another notable methodological approach for the development of mining and environmental planning projects is described in the studies of Molina (2001) and Sanchez and Cardenas (2001). They use the concept of geological-mining potential (PGM), i.e. the capability of the territory to offer quality mineral resources, in quantity and exploitability conditions that favour its mining use (Sanchez, and Cárdenas, 2001). One example is the project for the creation of an industrial-mining park intended for the planning and development of clay mining activity located in the Mochuelo Park, south of Bogotá (INGEOMINAS, 2000; Sanchez and Cardenas, 2001). To obtain the value of the geological-mining potential (PGM), an expression that combines different variables was used: quantity (CN, calculated as resource tonnage), quality (CA, defined by the physicochemical properties), lithological continuity (CL, concerning lateral and vertical variations of the clays in the deposit, and the presence of sandy intercalations), structural complexity (EC, presence of folds, fractures, etc.), topographic relation (RT, constraints derived from topography for the extraction and transport of the material), and stripping ratio (RD, number of sterile material to be extracted per ton of clay).

Finally, a methodological approach that is considered of interest is the one that uses the concept of Geo-economic Risk in the Planned Project for the Marble Zone of Estremoz (PROZOM). The general methodology is structured into four stages. The first phase led to obtaining the so-called Geo-economic Risk Map at 1:5000 scale, based on the aptitude of the land to the production of ornamental rocks, considering the geological indicators: L (lithology), EG (geological structure) and F (fracturing) (Sobreiro et al., 2003; Falé et al., 2006; Midões et al., 2006).

Taking into consideration the whole set of reviewed studies, it is possible to draw some guidance on the extent to which the cartographic scale has an influence on the degree of detail in the geologic information that can be enforced to address spatial planning of the extractive activity (Fig. 3). When planning is focused on mineral resources, it is clear that the geological maps are the fundamental base of information. In those places where there is a good infrastructure of geological maps at an appropriate scale, the interpretation of geology may be sufficient for the delineation of the potential of geological resources. However, a general tendency to enrich the simple delineation of potentially exploitable resources has been observed, by introducing some valuations of resource quality, especially in the more detailed works. In planning for mineral resources, the geologic potential has normally been delimited by analysing geological information and maps, when the scale of work is not detailed (regional planning). But when it comes to local or municipal scales (large-scale mapping), planning requires far more data for a better delimitation of mineral resources. A detailed infrastructure of geologic knowledge is crucial for planning mineral resources, especially at local or municipal level.

## Introducción

Es evidente que la extracción de los recursos geológicos entra en conflicto de forma creciente con otros usos del territorio, tales como el desarrollo urbano, la agricultura, la conservación de la naturaleza, las infraestructuras de transporte, etc. (e.g.: Lüttig, 1987a, 1990; Bauer, 1993; Langer, 2002; Baretino *et al.*, 2003; García Cortés *et al.*, 2006; Luaces Frades y Gómez Sánchez, 2009). Esta conflictividad es reflejo en buena medida de la abundancia de casos que muestran cómo la actividad extractiva se ha realizado buscando la máxima rentabilidad económica, sin tener en cuenta las externalidades ambientales y sociales generadas. Sin embargo, es cierto que esta realidad ha ido cambiando con el progresivo desarrollo de normativas sobre rehabilitación/remediación para proyectos mineros y sobre la necesidad del estudio de los impactos ambientales asociados a ellos. Aún así, todavía hoy es razonable dudar de que los procedimientos de evaluación de impacto ambiental al uso sean capaces de llevar a cabo una correcta internalización de todos los costos ambientales y sociales que la minería produce, dada la dificultad de valorarlos correctamente, incluso cuando existe una voluntad de hacerlo. Además, en áreas donde los recursos minerales son relativamente abundantes, éstos son extraídos muchas veces desde numerosas explotaciones. Cuando esto ocurre, la acumulación de efectos ambientales producidos por el conjunto de todas ellas puede exceder a la simple suma de los efectos de cada explotación, lo que no está previsto en los proyectos de cierre o estudios de impacto ambiental individuales. La ocurrencia de tales hechos pone de manifiesto la oportunidad de considerar la actividad minera en el marco de la planificación u ordenación territorial (Arranz González y Alberruche del Campo, 2008).

Baretino (2002) subrayó que la planificación territorial aplicada a la actividad extractiva es, por lógica, más adecuada para los recursos minerales que suelen presentarse con relativa abundancia en cuanto a su distribución geográfica, como ocurre con las rocas industriales, entendidas según la clasificación de Bates (1969). No obstante, la ordenación territorial de la actividad extractiva podría igualmente ser de utilidad para otros tipos de recursos minerales abundantes en determinadas regiones, tales como el mineral de hierro o la turba. La clave, en todo caso, es que pueda ser oportuno el análisis de diferentes alternativas de localización de las explotaciones, pudiéndose seleccionar las más óptimas desde el punto de vista de la mayor rentabilidad con el mínimo impacto posible (Baretino, 2002; Arranz González y Alberruche del Campo, 2008). Según Cendrero (1988) la ordenación del terri-

torio: "es un proceso a través del cual se analizan los factores físicos naturales y socio-económicos de un área geográfica, se determinan las formas de uso que se consideran idóneas para cada parte de la misma, se define la amplitud y localización y se establecen las normas que han de regular el uso del territorio y los recursos de dicha área." Dicho proceso ha de estar cimentado en conocimientos científicos y técnicos de carácter pluridisciplinar y cartografías temáticas (Zoido, 1998). Generalmente, los trabajos de planificación centrados en la actividad minera no tratan de cuestionar los derechos existentes en el territorio, centrándose en el análisis de la potencialidad y de la fragilidad del mismo de cara al establecimiento de proyectos de explotación de los recursos minerales, con el objetivo de minimizar los costes ambientales o delimitar las áreas en las que estos puedan ser aceptables o reversibles. Sin duda, una integración efectiva de la minería en la ordenación territorial pasa por conocer con suficiente detalle y delimitar geográficamente aquellas zonas del territorio que albergan los recursos mineros, evaluando la cantidad y calidad de éstos (Baretino *et al.*, 2003). Sin entrar en matizaciones sobre el significado que los expertos atribuyen a los términos ordenación/ordenamiento territorial y planificación territorial, ambos conceptos se emplearán indistintamente en este trabajo, lo que no afecta al objetivo principal: revisar diferentes fórmulas, adoptadas en trabajos orientados a la planificación territorial, para la obtención y la interpretación de la información de cara a la delimitación cartográfica del potencial geológico-minero.

## Estudios orientados a la protección de los recursos de rocas industriales

Antes de pasar a tratar el tema de la potencialidad o aptitud de los recursos mineros en lo que se han denominado proyectos de ordenación/ordenamiento minero-ambiental, merece la pena comentar algunos trabajos orientados a la planificación que, aunque dejan de lado el análisis de otras variables ambientales, ilustran sobre la valoración de los recursos minerales y su delimitación geográfica.

Existe una necesidad de considerar los recursos mineros como parte de los planes de manejo del territorio para evitar restricciones innecesarias en áreas con alto potencial en recursos minerales. Incluso pensando en aquellos recursos mineros de amplia distribución geográfica, como es el caso de los áridos, una planificación efectuada sin considerar o reconocer los recursos geológico-mineros puede inhabilitar o esterilizar zonas que albergan mate-

riales que cumplen unas especificaciones de calidad cada vez más exigentes, con lo que se pone en riesgo la posibilidad de atender a la demanda futura. Autores como Chambers (1985), Lüttig (1990), Stenestad y Sustrac (1994) o Langer (2002) llaman la atención sobre este punto, presentándolo como otro motivo de preocupación añadido al rechazo social o a la competencia por el uso del suelo. Además, cada vez se hace más evidente que, aunque las rocas industriales son relativamente abundantes en comparación con otros tipos de recursos minerales, también son susceptibles de agotamiento en lo que se refiere a escala regional (Calvo, 2000). Por todo ello, además de los estudios específicos o las cartografías dedicadas a los recursos mineros que muchos servicios geológicos realizan sistemáticamente, desde los años setenta se han venido desarrollando una serie de trabajos encaminados expresamente a reconocer o salvaguardar las zonas con potencial para la explotación de los mismos. Se trataría de llamar la atención de los planificadores sobre aquellas áreas que presentan las mejores condiciones para la prospección de un determinado recurso geológico-minero, mediante la delimitación cartográfica de las unidades litoestratigráficas o formaciones geológicas de las que, a la luz del conocimiento existente, engloban un determinado recurso y por ello se pueden considerar potencialmente explotables. Es necesario dejar claro que lo que normalmente se busca es la identificación de los recursos potenciales o probables, no las reservas. Igualmente, es necesario remarcar que el conocimiento geológico de un área nunca es completo, por lo que toda delimitación cartográfica es susceptible de verse modificada con posterioridad. La base de esta delimitación es siempre la interpretación con criterio experto de la cartografía geológica, siendo muchas veces acompañada de una revisión de otra información geológica disponible y del estudio de la actividad extractiva en el territorio.

Un ejemplo de este tipo de trabajo es el inventario desarrollado para el consejo de los siete condados (Minnesota, USA), cuyo objetivo era identificar y proponer medidas de protección para los depósitos de áridos (Schenk, 1993). El estudio se basó en la información geológica existente: mapas geológicos, topográficos y de suelos, sondeos, etc., y contó con la participación de grupos de interés, dando lugar a mapas en los que se indicaban los recursos potenciales en sentido amplio, sobre la base de una serie de criterios. Para los recursos de áridos de machaqueo se consideraron: los afloramientos de las formaciones conocidas como Platteville (calizas) y Prairie du Chien (dolomías), los espesores de recu-

brimiento y el valor de la información existente. Además, los espesores de recurso de 10 y 30 pies (unos 3 y 9 m) sirvieron para establecer calificaciones como potenciales o significativos. Para los recursos de arenas y gravas se tuvieron en cuenta los criterios siguientes: proporción de gravas ( $\geq 35\%$ ), espesor superior a 20 pies (aproximadamente 6 m), espesor del recubrimiento inferior o igual a 10 pies (unos 3 m), profundidad del nivel freático inferior a 20 pies (6 m), extensión del depósito y calidad relativa de la información disponible. Llama la atención cómo el criterio de proximidad del nivel freático a la superficie del terreno se considera positivamente, al contrario de lo que sucede en un trabajo del que se hablará más adelante (IGME, 2009; Arranz González *et al.*, 2009).

La realización de este tipo de cartografías ha sido más sistemática en Gran Bretaña, donde existen guías para la elaboración de mapas en los que se delimitan áreas de salvaguardia de los recursos minerales (McEvoy *et al.*, 2007; Wrighton *et al.*, 2011). Estos mapas no son de obligado cumplimiento, pero sí es obligada su consulta para el diseño de instrumentos de planificación a nivel local. Tampoco presuponen la aprobación de proyectos ubicados en las áreas de salvaguardia, ni excluyen la posibilidad de otro tipo de aprovechamientos del terreno, incluidos aquellos que impiden la actividad minera. En los mapas obtenidos se delimitan los recursos siguiendo una sistemática general cuyos primeros pasos consisten en: identificación de la mejor información disponible sobre geología y recursos minerales existente para el territorio, decisión de cuáles son los recursos minerales a salvaguardar (cuáles pueden llegar a tener interés económico), y realización de consultas sobre cómo deben determinarse las áreas de salvaguarda, incluyendo franjas de protección y espesores mínimos para que la explotación sea económicamente viable en lo que se refiere tanto al recurso como al recubrimiento. El tipo de recomendaciones obtenidas mediante consultas pueden ser tales como que el espesor de recubrimiento no deba superar un determinado valor, o que determinado tipo de formación geológica no interesa en determinado sitio concreto, debido a particularidades que inciden en su calidad. La delimitación elimina las áreas urbanas e incluye franjas mínimas de protección, variables en función de las técnicas empleadas para la explotación del recurso (desde maquinaria pequeña a arranque con explosivos). Igualmente se considera la ampliación de la delimitación mediante franjas de 100 m para áridos naturales, así como franjas variables de hasta 200 m para áridos de machaqueo, en previsión de la posible esterilización por desarrollo de otros usos del suelo (urbanos y de in-

fraestructuras) o por razones basadas en la litoestratigrafía local.

En Inglaterra, el desarrollo de la cartografía de áreas de salvaguardia de minerales se ha realizado por condados, resultando en una cierta diversidad en las escalas de presentación final de resultados, que oscilan desde valores próximos a 1:75 000 hasta valores que rondan 1:200 000. Sin embargo, en Gales se realizó un plan de cartografía sistemático de las áreas de salvaguardia, siguiendo la distribución de hojas 1:100 000. Wrighton y Humpage (2012) explican como se desarrolló la cartografía de salvaguardia de áridos en Gales, donde la delimitación de las zonas de interés fue fundamentalmente inferida a partir de la información geológica existente, y se establecieron categorías de importancia del recurso a nivel local, regional o nacional, en base a un reconocimiento de la calidad de los recursos por comparación con especificaciones técnicas.

No cabe duda de que las cartografías de recursos mineros, o de áreas de salvaguardia de recursos potencialmente explotables pueden ser por sí mismas instrumentos de gran valor como punto de partida para la integración de los recursos mineros en el proceso de planificación territorial. Sin embargo, no incorporan todas las variables que razonablemente deberían intervenir en la selección de zonas sobre las que implantar la actividad extractiva, además de que algunos criterios valorados como positivos para la explotación minera pueden ser inaceptables desde el punto de vista ambiental, lo que además puede depender mucho de la situación geográfica concreta.

### **Metodologías de ordenación/ordenamiento minero-ambiental**

Existen una serie de metodologías de trabajo que, junto al estudio de la distribución de los recursos geológicos, se proponen analizar otras variables ambientales de importancia. Las metodologías que se han denominado de ordenación u ordenamiento minero-ambiental intentan ajustarse a las fórmulas y métodos de trabajo de la ordenación territorial, e incluyen una fase de diagnóstico territorial para evaluar la capacidad de acogida ante la actividad extractiva mediante un modelo impacto/aptitud. En lo que concierne a la valoración del potencial geológico-minero, es la información disponible y la escala de trabajo (a veces definida considerando la información disponible sobre otros elementos del medio) las que condicionan los procedimientos para la delimitación cartográfica y la calificación de los recursos potencialmente explotables.

Según Baretino (2002), los primeros trabajos de planificación territorial que analizaron el potencial de los recursos geológicos considerando además los aspectos ambientales se desarrollaron en la década de 1970 por el Servicio Geológico de Hannover (Alemania). Se trata de conjuntos de mapas geoambientales o geocientíficos que traducen la información geológica de modo que pueda servir de herramienta útil, simple y de fácil comprensión para los planificadores a escalas regional y urbana o local (Lüttig, 1979). En el año 1972 se elaboró el "Conjunto de Mapas Geocientíficos del Potencial del Medio Natural de la Baja Sajonia" (1982, 1987a), a escala 1:200 000. Estos conjuntos de mapas, denominados originalmente *Geoscientific Maps of the Natural Environment's Potential* (GMNEP), incorporan información geológica y geotemática, junto con información correspondiente a otros componentes del medio (vegetación, usos del suelo, hábitats, paisaje, etc.). La realización de este tipo de mapas se fue extendiendo en las diferentes regiones alemanas y austriacas, a escalas que llegan al nivel de detalle de 1:50 000 y 1:25 000 (Lüttig, 1982, 1987a; Becker-Platen et al., 1987; Mattig, 1992). Los conjuntos de mapas parten de las cartografías básicas de primer nivel: mapas geológicos, hidrológicos, de pendientes, de suelos, etc. Combinando la información contenida en dichos mapas de primer nivel, se elaboran mapas derivados en los que se destacan diferentes aspectos de interés para la planificación, iniciándose una interpretación de los elementos y procesos ambientales. Un tercer nivel establece ya designaciones relativas a los aprovechamientos del territorio en función de los recursos minerales superficiales (áridos y rocas industriales) y profundos (sal, potasas, petróleo, gas, menas metálicas, etc.), las áreas de diferente potencial de aguas subterráneas, etc. En un cuarto nivel se superpone la información de los anteriores conjuntos de mapas para obtener mapas de conflictos. Las fases de trabajo que incluyen la elaboración de las cartografías comprendidas entre los niveles segundo y cuarto serían en cierto modo equivalentes a la denominada fase de diagnóstico en algunos de los proyectos de ordenación minero-ambiental que más adelante se comentan. Finalmente se generan mapas de síntesis en los que se representan áreas delimitadas en función de las prioridades para determinados usos del suelo desde un punto de vista geocientífico, entre los que se encuentra la extracción de materias primas minerales.

En España, los primeros mapas geocientíficos se desarrollan, a partir de 1975, por un equipo del Departamento de Geología de la Universidad de Cantabria, a escala 1:50 000 (Cendrero, 1975; Cendrero y Díaz de Terán 1987). Los objetivos principales de estas carto-

grafías eran proporcionar representaciones geográficas de las cualidades significativas de los elementos ambientales relevantes de cara a la planificación territorial. Se siguió una aproximación metodológica analítica, mediante la elaboración de mapas temáticos: geológico y de depósitos superficiales, geomorfológico, procesos geodinámicos, suelos, vegetación, pendientes, altitudes, paisaje, población, lugares de interés, etc. Posteriormente, la evaluación de la idoneidad del territorio para cada actividad o uso del suelo es fruto de la integración de todos los valores obtenidos en cada sector del territorio (en este caso cuadrículas) en una fase de análisis y diagnóstico territorial, mediante un modelo impacto/aptitud, aplicando coeficientes de ponderación a cada elemento ambiental. La delimitación de los recursos mineros se realizó mediante un trabajo de interpretación de la información geológica, con el apoyo de un reconocimiento de la actividad extractiva existente.

Otra importante aproximación a la planificación territorial en la que el objetivo principal (aunque no el único) fue la protección de los recursos minerales fue la desarrollada por el Departamento de Recursos Minerales del Servicio Geológico de Austria, para la elaboración de "Mapas de Protegibilidad de los Recursos de Áridos"; a escala 1:20 000. En ellos se representan las zonas del territorio prioritarias para la explotación del recurso minero con vistas a satisfacer la demanda, recomendando su protección y reserva para la actividad extractiva futura (Letouzé-Zezula, 1993; Heinrich *et al.*, 1994; Letouzé-Zezula *et al.*, 1996). El método seguido en estos trabajos consistió en una evaluación del potencial de los recursos, teniendo en cuenta los posibles efectos sobre los otros potenciales del medio. Así, se aplicó un modelo de impacto/aptitud ("conflictividad/capacidad actual" en la terminología original) para obtener la protegibilidad actual (necesidad de protección) de los recursos de áridos para su futura explotación. Toda la metodología de trabajo se diseñó para funcionar mediante el empleo de un SIG. La capacidad actual del potencial del medio, de la que se definen cuatro categorías, se evalúa a partir de la cantidad y calidad de los recursos (capacidad principal), a partir de la evaluación de la existencia de discontinuidades litológicas y de espesores mínimos de 7 m para los áridos naturales. Se delimitaron zonas en las que el desarrollo de proyectos de explotación debe ser restringido o prohibido en base a los impactos ambientales que se generarían, incluyendo franjas de protección (300 m) alrededor de las áreas de recursos hídricos subterráneos, asentamientos y áreas agrícolas o naturales reconocidas como valiosas. El reconocimiento y evaluación de los recursos mineros se realizó a partir de la cartografía geológica existente

y de una cuantiosa documentación sobre la extracción de áridos en la región.

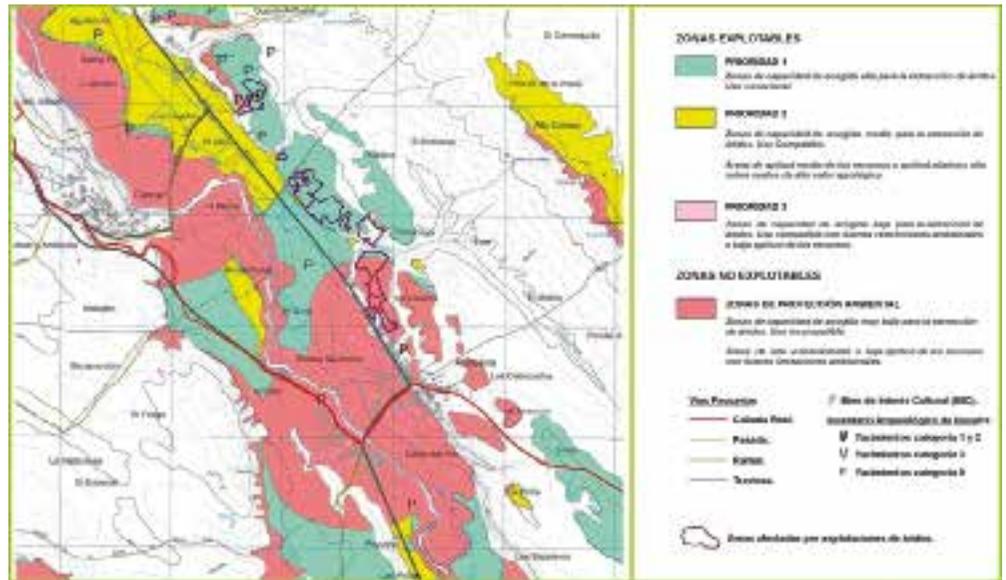
Los ejemplos anteriores pueden considerarse en cierto modo precursores de una serie de métodos en los que la determinación de la capacidad de acogida del territorio ante la explotación minera se realiza a través de un balance entre la vulnerabilidad, fragilidad o sensibilidad ambiental ante la actividad extractiva, y la potencialidad que presenta para el desarrollo de dicha actividad (e.g.: Baretino *et al.*, 1994; IGME, 1995; Sánchez y Cárdenas, 2001; Martínez-Plédel *et al.*, 2006; INTERRA, 2007; Arranz-González y Alberruche del Campo, 2009). La capacidad de acogida puede entenderse como la idoneidad del territorio ante la actividad extractiva, teniendo en cuenta simultáneamente la medida en que el territorio cubre los requerimientos de localización de dicha actividad, así como los efectos de ésta sobre el medio (Gómez Orea, 1994).

En los años 90 del pasado siglo, el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), desarrolló una línea de trabajo denominada Ordenación Minero-Ambiental de los recursos minerales, cuyo objetivo principal es la elaboración de mapas de ordenación minero-ambiental (un ejemplo puede observarse en la Fig. 1). En dichos mapas se definen y delimitan diferentes categorías sobre las áreas con recursos potencialmente explotables, en aras de lograr una propuesta de ordenación: zonas de protección ambiental, donde no es recomendable la explotación, y zonas explotables con diferentes niveles de prioridad. Como en casos anteriores, los mapas de ordenación minero-ambiental surgen de un diagnóstico territorial en el que se efectúan valoraciones de los elementos del medio y se estudia la capacidad de acogida del territorio ante la actividad extractiva mediante un modelo de impacto/aptitud. Evidentemente, aunque no se haya señalado explícitamente, las áreas seleccionadas como de máxima prioridad para el desarrollo de la explotación minera son susceptibles de proponerse como áreas de salvaguardia por parte de los responsables de la planificación. Aquí se comentarán algunos detalles sobre la valoración de los recursos minerales efectuada en dos de dichos trabajos. Más información sobre otros trabajos desarrollados por el IGME en materia de ordenación minero-ambiental puede obtenerse de la consulta de Baretino *et al.* (2003), Martínez Plédel *et al.* (2006) y Arranz-González y Alberruche del Campo (2008).

El estudio de Ordenación Minero-Ambiental del yacimiento de pizarras ornamentales de La Cabrera (León), cuyo objetivo fue obtener el "Mapa de Ordenación Minero-Ambiental" a escala 1:25 000 (Baretino *et al.*, 1994; IGME, 1995; Baretino, 2002), se desarrolló en un territorio prácticamente virgen en lo que

**Figura 1.** Fragmento del Mapa de Ordenación Minero Ambiental de la zona occidental de la Ribera del Ebro en Navarra (IGME, 2009; Arranz González et al., 2009).

**Figure 1.** Detail of the Map of Mining-Environmental Planning of the western zone of the Ebro River in Navarra (IGME, 2009; Arranz González et al., 2009).



respecta a la actividad extractiva. Sin embargo, la comarca de La Cabrera comparte con la comarca de Valdeorras el Sinclinal de Truchas, que es una megaestructura geológica en la que se concentra la minería española de pizarra para cubiertas. En lo que se refiere al potencial de los recursos explotables, se partió de un detallado estudio geológico previo (ITGE, 1990), como base para la caracterización geológica y tecnológica de los recursos.

De las cuatro formaciones geológicas consideradas como litotectos de pizarra para cubiertas presentes en el Sinclinal de Truchas, en la comarca de La Cabrera se consideraron de interés dos formaciones conocidas como Rozadais y Luarca, y la denominada capa Forna, perteneciente a la formación Losadilla. Con estas premisas, y a partir de la cartografía geológica, se confeccionó un mapa de recursos potencialmente explotables. También se realizó un inventario ambiental, el cual incluyó mapas de suelos, vegetación, clima, pendientes, altitudes, usos del suelo, patrimonio cultural, etc. Las primeras fases del estudio incluyeron también un análisis de la actividad minera consistente en la caracterización técnica, económica y ambiental de las explotaciones existentes en la zona. Posteriormente se realizó un diagnóstico territorial el cual implicó: la valoración del territorio en términos de méritos de conservación; la estimación de la fragilidad o vulnerabilidad del territorio ante la actividad extractiva, en base al valor natural o valor de conservación del mismo; la estimación de la potencialidad o aptitud del territorio respecto a la explotación minera, y la determinación de la capacidad de acogida del territorio respecto al

uso minero. Todas las valoraciones hechas a partir de la información básica que culminan en un mapa de capacidad de acogida se realizaron por métodos de desagregación en componentes sobre unidades territoriales previamente definidas o unidades de síntesis (Gómez Orea, 1994). La aptitud representa la medida en que el territorio cubre los requisitos que exige la localización y el aprovechamiento minero de los recursos, lo que equivale en este caso a la potencialidad de cada unidad territorial desde el punto de vista de la explotación de pizarra. La estimación de la aptitud del territorio se realizó en función de la información previa existente, que era bastante detallada en algunas partes del territorio, pero no se realizaron nuevos trabajos de prospección, si bien la realización de un inventario de explotaciones y el apoyo de personal con profundos conocimientos de la compleja geología de la zona llevaron a un resultado mucho más que aceptable para el objetivo general del proyecto. La aptitud (APTIT) del territorio se definió a partir de los siguientes componentes: recursos explotables (RECU), con el que se valora de forma cualitativa la cantidad y calidad de los recursos de pizarra existentes; explotabilidad (EXPL) o valoración de las características del macizo rocoso y su estado de fracturación con vistas a la explotación de pizarra; y altitud (ALTI) y pendiente (PEND), por ser factores condicionantes respecto a la optimización del beneficio minero, y respecto a la ubicación de escombros, asignándoles valores a partir de la información contenida en los mapas derivados de elevaciones (hipsométrico) y de pendientes. Todas las valoraciones de los diferentes parámetros se hicieron para

cada una de las unidades territoriales definidas. El valor total de la aptitud se obtuvo según la siguiente expresión:

$$\text{APTIT} = 0.3 \times \text{RECU} + 0.5 \times \text{EXPL} + 0.1 \times \text{ALTI} + 0.1 \times \text{PEND}$$

Para valorar la aptitud de cada unidad territorial en función de la cantidad y calidad de los recursos potencialmente explotables (RECU), se definió un indicador cualitativo basado en la corrida de los niveles potencialmente explotables, o longitud de la horizontal del plano de la estratificación de las formaciones geológicas que albergan dichos niveles. Se definió un indicador (lcr), que es la corrida acumulada de las tres formaciones potencialmente explotables en cada unidad territorial, pero ponderando por la calidad de cada una de ellas:

$$\text{lcr} = 0.2 \times \text{C (capa Forna)} + 1 \times \text{C (Fm. Rozadais)} + 0.4 \times \text{C (Fm. Luarca)}$$

Los valores obtenidos al aplicar la fórmula oscilaron entre 0 y 60, asignándose el valor 5 al parámetro RECU, cuando lcr superó el valor de 30. La explotabilidad de los recursos potenciales de pizarra para techar depende del estado del macizo rocoso: fracturación y estructura geológica. La situación en que se presentan los diferentes elementos estructurales (diaclasas, estratificación, esquistosidad, etc.), y las relaciones espaciales entre ellos (lineaciones de intersección, *kink bands*, etc.), determinan una mayor o menor explotabilidad de los niveles potencialmente explotables. La valoración de la explotabilidad (EXPL) se realizó a partir de la caracterización de las explotaciones de pizarra existentes en el área en estudio, y del conocimiento geológico-minero de las áreas potencialmente explotables. Por otro lado, se consideró que la aptitud para la explotación de pizarras decrece con la pendiente del terreno, debido al mayor volumen de desmonte necesario para la extracción, los mayores problemas geotécnicos, y los mayores problemas en la ubicación y diseño de escombreras de estériles. Por ello se definieron diferentes intervalos de pendiente y se consideró que la explotación es prácticamente inviable para valores de 50% o más de grado de pendiente. Igualmente, la altitud, como componente de la aptitud para la explotación, se valoró considerando intervalos y que, a partir de 1500 m de cota, el frío acorta de tal modo la temporada de explotación que se puede considerar limitante. Todos los parámetros se normalizaron o valoraron directamente entre cero y cinco. Todo el proceso de generación de mapas derivados y de valoración por unida-

des territoriales de los diferentes parámetros, así como la ponderación por porcentajes de superficie ocupada de cada intervalo de valoración en cada unidad territorial se facilitó mediante el empleo de un SIG.

Resulta interesante comentar que la metodología desarrollada por el IGME en el estudio de la Cabrera ha sido la base para diversos trabajos de ordenación llevados a cabo en Ecuador (Loayza y Carrión, 2003; Ladines y Carrión, 2007). En particular, la valoración de la aptitud de los recursos de piedra caliza en el Noroeste de Guayaquil se planteó con una fórmula semejante a la empleada en el estudio del IGME (Ladines y Carrión, 2007):

$$\text{APTIT} = 0.4 \times \text{RECU} + 0.2 \times \text{EXPL} + 0.1 \times \text{ALTI} + 0.3 \times \text{PEND}$$

Puede observarse que los pesos empleados en la fórmula son ligeramente diferentes a los empleados en el estudio del IGME, así como los criterios de valoración, los cuales como es lógico se ajustan a las circunstancias y tipo de recurso minero de aquel territorio, así como a las cartografías básicas y fuentes de información disponibles.

Otro trabajo interesante en el que se realizó una delimitación de las áreas de mayor interés para la explotación minera, mediante la comparación de la capacidad de acogida y la aptitud minera del territorio en unidades territoriales homogéneas previamente definidas, es el documento técnico que sirve de base para el *Plan Especial de Actividades Extractivas de Granada de Abona* (Hernández-Durán, 2000). En este trabajo, el ámbito geográfico del Plan fue analizado en sus vertientes del medio físico, socioeconómico y cultural, partiendo de una fase de inventario, para continuar con una segunda fase de análisis y diagnóstico. Como en el caso anterior, se procedió a realizar una zonificación del territorio, delimitando zonas explotables, en diferente orden de prioridad, zonas explotables pero con condicionantes o limitaciones, y zonas no explotables sobre un mapa final de Ordenación Minero-Ambiental. Para el análisis de la información se trabajó con una aplicación SIG para el procesamiento y obtención de los mapas de síntesis. En lo referente al medio geológico, fue necesario elaborar la cartografía geológica del municipio, mediante una definición pormenorizada de posibles yacimientos de rocas ornamentales, áridos para prefabricados, correctores agrícolas y puzolanas: lajas fonilíticas, basaltos y traquibasaltos, picón (depósitos piroclásticos basálticos), gravas y arenas, lapilli, y puzolanas. Para la elaboración de la cartografía de los recursos minerales, fue necesario llevar a cabo: una interpretación

fotogeológica del municipio de Granadilla, como estudio previo al trabajo de campo, dibujándose los contornos correspondientes a las zonas de extracción o movimientos de tierra, a escala 1:10.000, y un estudio de campo para comprobar los puntos localizados en la fotointerpretación. A la vez, se realizó un inventario de todas las extracciones, tanto activas como inactivas de las zonas de explotación (más de 90 puntos), analizándose la actividad minera en su vertiente técnica y ambiental. Todo ello permitió delimitar cartográficamente los yacimientos con posibilidades de explotación, obteniéndose el mapa de Yacimientos de Interés Minero, los cuales una vez evaluados permiten obtener un Mapa de Calidad de Yacimientos.

Entre los trabajos de ordenación minero-ambiental dedicados a los áridos o agregados naturales destaca el desarrollado por Colegial Gutiérrez (2004) sobre los recursos existentes en la cuenca del río Jarama (Madrid). El tipo de materiales a los que se dirigió el estudio agrupa todos los depósitos pliocuaternarios y cuaternarios susceptibles de explotación minera: rañas, terrazas, aluviales, y algunos coluviones y conos de deyección. En palabras del autor: "el fundamento metodológico del trabajo es un refinamiento de una línea de investigación en Ordenación Minero-Ambiental de recursos mineros desarrollada por el Instituto Geológico y Minero de España". En esencia, como sucede con la metodología del IGME, se aplica un balance entre aptitud para la extracción de áridos y el impacto que esta actividad podría generar. Sin embargo, la aproximación metodológica difiere en algunos aspectos. Por un lado, se estimó conveniente conjugar el empleo de un Sistema de Información Geográfica de tipo *raster* con técnicas multicriterio de ayuda a la decisión. Además, los análisis y valoraciones se realizaron sobre celdas regulares de territorio (teselas), sin definir unidades territoriales de análisis. Las escalas a las que estaba representada la información de partida oscilaban entre 1:25 000 y 1:50 000. La resolución espacial se estableció de 25 metros para presentar los resultados a escala 1:50 000. La determinación del valor de aptitud y el de impacto sobre cada una de las celdas en las que se dividió el territorio en estudio proporcionó mapas de aptitud y de impacto en los que la variación de estos parámetros se expresan celda a celda. El método analiza el resultado generado automáticamente, buscando los agrupamientos de celdas más interesantes desde el punto de vista minero.

Tras una revisión significativa de bibliografía sobre los depósitos de áridos presentes en la zona, se planteó que la aptitud podía expresarse como una función de tres parámetros: porcentaje de finos, promedio del espesor del depósito y distancia a centros de consu-

mo. Otro aspecto normalmente considerado, como es el recubrimiento, resulta poco discriminante en la zona de estudio, en la que los recubrimientos están formados principalmente de suelos vegetales de hasta un metro de espesor (ITGE, 1996). El estudio de la posición del nivel freático se consideró a la hora de analizar el potencial impacto sobre las aguas subterráneas. La importancia relativa de cada uno de los criterios se realizó mediante procedimientos de evaluación multicriterio aplicados a la opinión de expertos en temas mineros y ambientales a quienes se les entregó la lista de criterios y se les pidió ordenarla. Las preferencias sobre los criterios se normalizaron usando el método de las jerarquías analíticas hasta obtener los siguientes pesos: 0.4615, para el porcentaje de finos; 0.4615, para el espesor, y 0.0769, para la distancia a los centros de consumo.

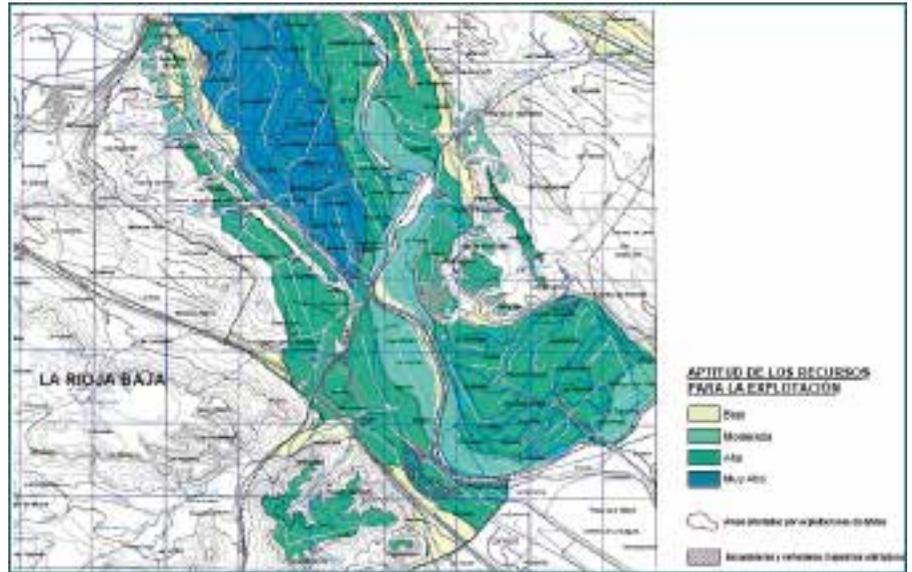
Fue necesario elaborar un mapa de espesores de los diferentes depósitos presentes en el área de estudio, en base a criterios geomorfo-topográficos y partiendo de una importante revisión de información que incluyó: reportes técnicos, artículos publicados, tesis, datos de sondeos eléctricos verticales, etc. Las diferencias de altura con respecto a la base de los depósitos se contabilizaron como puntos en un mapa. Para su tratamiento y conversión en estructura *raster*, se aplicó un método automático de interpolación. Las valoraciones sobre el mapa de espesores aplican una función sigmoideal, cuyos puntos de inflexión inferior y superior respectivamente fueron 1 y 6 metros de espesor. Estos criterios están de acuerdo con el mínimo técnicamente aceptable propuesto por Crimes *et al.* (1994) y la idea de que la capacidad del depósito tiende a mejorar cuando se superan los 6 metros de espesor (Scott *et al.*, 1984). En cuanto a las características granulométricas, se optó por considerar el contenido de finos como indicador de aptitud por su comodidad. De otra parte, no se tuvo en cuenta la proporción de tamaños mayores a 40 mm, ya que tecnológicamente este aspecto tiene fácil control durante el beneficio minero. Tampoco se consideró la presencia de materia orgánica que en el caso del Jarama es casi siempre inferior al 1 % (ITGE, 1995). Para estudiar la distribución de tamaños de las alternativas establecidas, se emplearon cerca de 150 curvas granulométricas procedentes, la mayoría, de los inventarios de rocas y minerales industriales realizados por el IGME. Se aceptó utilizar como criterio el porcentaje de finos inferiores a 80 micras, asumiendo que aquellos porcentajes iguales o inferiores a 6 % representan áridos de buena aptitud para su explotación, mientras que, en la medida que este porcentaje va en aumento, la aptitud de los depósitos empeora. A partir de la localización de los puntos con datos de distribución gra-

nulométrica, se obtuvo un mapa de variación continua del porcentaje de finos de tamaño menor a 80 micras mediante métodos de interpolación, lo que se tradujo en un mapa de valores del porcentaje de finos. Por último, el análisis de la proximidad de las explotaciones a los centros de consumo se realizó a partir las distancias desde los mismos, lo que permite obtener un mapa de valor, concediendo mayor preferencia a yacimientos más cercanos a los principales centros de consumo (municipios con más de 500 habitantes por kilómetro cuadrado). El mapa de aptitud final se obtuvo como resultado de combinar los mapas normalizados correspondientes a los diferentes factores considerados, aplicando a cada factor el correspondiente peso.

Otra variante metodológica es la que se desarrolló en el proyecto de Ordenación Minero-Ambiental para el sector de los áridos naturales en la Zona Occidental de la Ribera del Ebro (Navarra) (IGME, 2009; Arranz González *et al.*, 2009). En él se realizó una valoración directa de los diferentes elementos del medio cartografiados sin pasar por una subdivisión del territorio en unidades. Esta forma de efectuar las valoraciones (enfoque analítico) permite minimizar la carga de subjetividad que conlleva la definición apriorística de unidades ambientales o territoriales, pero necesita nutrirse de mapas temáticos, para cada uno de los atributos seleccionados, de una calidad comparativamente mayor. Cada elemento elegido fue valorado individualmente, realizando después una evaluación directa del grado de compatibilidad de la actividad minera sobre las áreas de mayor valor mediante la capacidad de acogida, aplicando un modelo de impacto/aptitud. También se realizó una caracterización técnica y ambiental de las explotaciones mineras, activas, inactivas y abandonadas, con el fin de identificar la problemática ambiental que éstas inducen, en paralelo a una caracterización geológica y minera de los recursos, junto con su delimitación geográfica en mapas de recursos potencialmente explotables distribuidos según las hojas 1:25 000 del Mapa Topográfico Nacional. La cartografía básica utilizada para el trabajo se obtuvo del Proyecto "Revisión de la Cartografía de Navarra, a escala 1:25 000", así como de la cartografía geomorfológica a la misma escala. Se incluyeron como recursos potenciales: los depósitos aluviales de los ríos Ebro y Ega, incluidas todas las terrazas, algunos conos de deyección y glaciares, así como los aluviales de los pequeños cauces que desaguan al Ebro. El estudio del medio y de la actividad extractiva en la zona llevó a la conclusión de que la accesibilidad no permite discernir diferentes clases en la zona de trabajo. Además, la concentración de las instala-

ciones de tratamiento de los áridos en puntos generalmente muy accesibles complica el análisis, al tiempo que minimiza la importancia de este factor en la zona de trabajo. Es por esto que este factor no fue considerado para la valoración de la aptitud, la cual se analizó a partir de tres tipos de mapas. En primer lugar, teniendo en cuenta las características granulométricas y litológicas de los diferentes depósitos, se confeccionaron mapas de calidad de los recursos potencialmente explotables. Se valoró principalmente la granulometría del material, pero también se consideró la contaminación con material fino (arcillas y limos) y el grado de cementación. Se diferenciaron tres clases de calidad: alta, media y baja. Por otro lado, se realizaron mapas de potencia de los recursos potencialmente explotables. Para la realización de estos mapas se tuvieron en cuenta tres tipos de datos: la potencia observada en frentes de explotaciones activas y abandonadas, las potencias medidas en recorridos de campo, y la información de sondeos eléctricos verticales realizados para el Proyecto Hidrogeológico de Navarra (Castiella *et al.*, 1982). También se tuvieron en cuenta las descripciones de los depósitos aportadas por las memorias de la cartografía existente en la zona, así como las de otros estudios sobre la geología local. Se diferenciaron cuatro tipos de áreas cuyas potencias (en metros) estaban comprendidas entre cero y ocho, entre ocho y quince, entre quince y veinticinco, y más de veinticinco. Por último se consideró la posición del nivel freático, pues la lectura de diversas Declaraciones de Impacto Ambiental de proyectos de graveira en la zona de trabajo dejaba bien claro que las explotaciones de gravas debían respetar un espesor de un metro por encima del mismo en explotaciones situadas en terrazas bajas. Esta realidad se tuvo en cuenta como un factor limitante desde el punto de vista de la aptitud, al ser una circunstancia que reduce la potencialidad del terreno para la explotación de áridos, suponiendo una limitación real en cuanto a la profundidad de explotación. La aptitud final se obtiene combinando la información obtenida de los anteriores mapas sin aplicar una fórmula fija. Mediante la consideración conjunta de todos los elementos más arriba comentados, y su distribución geográfica, se llegaron a discriminar cuatro grupos de valoración del recurso analizado: aptitud baja, aptitud moderada o media, aptitud alta y aptitud muy alta. La característica fundamental a la hora de valorar la aptitud fue la calidad del recurso, puesto que la potencia se mostró como suficientemente buena en casi toda la zona de trabajo, lo que supone una capacidad de discriminación menor. La Figura 2 muestra el aspecto final de los mapas de aptitud obtenidos.

**Figura 2.** Fragmento del mapa de aptitud de los recursos de áridos en la de la zona occidental de la Ribera del Ebro en Navarra (IGME, 2009; Arranz González et al., 2009).  
**Figure 2.** Detail of the map of potential mineral aggregate resources of the western zone of the Ebro River in Navarra (IGME, 2009; Arranz González et al., 2009).



Otra aproximación metodológica destacable para la elaboración de proyectos de ordenamiento mine-ro-ambiental es la que se describe en los trabajos de Molina (2001) y Sánchez y Cardenas (2001). En ellos se parte del concepto de geopotencial, introducido por Velásquez (1997) ampliando la concepción original de Lüttig (1989), e incluye el indicador denominado potencial geológico minero (PGM), como uno de los componentes de dicho geopotencial. El geopotencial representa la totalidad de recursos y de restricciones inherentes al conjunto de elementos del medio físico, principalmente los condicionantes geológicos, es decir es la capacidad medible que poseen los elementos del medio físico para proporcionar un uso sostenible del territorio (Velásquez, 1997; Velásquez, 2004). El potencial geológico minero se define como la capacidad que tiene el territorio de ofrecer recursos minerales con calidad, cantidad y en condiciones de explotabilidad que favorecen su aprovechamiento minero (Sánchez y Cárdenas, 2001). Un ejemplo de valoración de dicho potencial se muestra en el proyecto para el ordenamiento del Parque Mochuelo, situado al sur de Bogotá, que pretende ordenar el desarrollo de la actividad extractiva y transformadora de minerales arcillosos (INGEOMINAS, 2000; Sánchez y Cárdenas, 2001). El estudio de ordenación de dicho espacio se inició con el inventario y cartografía a escala 1:25 000 de los principales elementos del medio físico y con la valoración del geopotencial del territorio en una serie de unidades de integración, las cuales surgen del análisis y combinación de la información suministrada por la geomorfología y las unidades geológico-mineras. Para cada unidad de in-

tegración se realizó igualmente un análisis del grado de respuesta del territorio en términos de su fragilidad o susceptibilidad al deterioro frente al aprovechamiento de recursos de arcillas mediante la valoración de la capacidad de acogida. El análisis involucró, además, otras circunstancias adicionales al potencial natural que inciden en el desarrollo de la actividad minera como son: la disponibilidad legal de áreas libres para la minería, la conflictividad frente a otras actividades, la tolerancia social, y los conflictos de usos del suelo. Una revisión cartográfica de estudios geológicos de superficie permitió delimitar unidades arcillosas a escala 1: 25 000, a la que se sumaron recorridos de campo perpendiculares a las estructuras geológicas, para obtener perfiles a escala 1:10 000. Con esta información se realizó una división de bloques geológico-mineros y se desarrollaron trabajos de exploración, incluyendo sondeos geoelectrónicos verticales y perforaciones, lo que permitió mejorar el conocimiento de los espesores de los paquetes de arcilla y los recubrimientos. Todo ello se acompañó de ensayos químicos y físicos de laboratorio sobre muestras tomadas en testigos de perforación, minas activas y afloramientos, proporcionando un mejor conocimiento de las características de calidad. Para obtener el valor del potencial geológico minero (PGM), se utilizó una expresión que combina las variables geológicas y mineras, y cuyos coeficientes de ponderación son el resultado del consenso entre los profesionales que participaron en el análisis:

$$PGM = 0.10 \times CN + 0.15 \times CA + 0.20 \times CL + 0.10 \times CE + 0.20 \times RT + 0.25 \times RD$$

Las variables utilizadas son: cantidad (CN, tonelaje calculado como recursos), calidad (CA, definida por las propiedades físico-químicas de cara al posible uso cerámico), continuidad litológica (CL, referente a las variaciones laterales o verticales de las arcillas en el yacimiento, por presencia de intercalaciones arenosas), complejidad estructural (CE, presencia de pliegues, fracturas, etc.), relación topográfica (RT, facilidad del terreno para la extracción y transporte del material, movimiento de estériles o acumulación de aguas), y relación de descapote (RD, cantidad de material no útil como recubrimiento superficial o estériles intercalados entre capas de arcilla, que se deben extraer por tonelada de arcilla).

Una última aproximación metodológica que se considera de interés es la que representa el concepto de Riesgo Geoeconómico en el Plan de Reordenamiento de la Zona de los Mármoles de Estremoz (PROZOM). El ámbito de aplicación de dicho estudio se circunscribe al Anticlinal de Estremoz (Portugal), el cual es considerado un importantísimo centro de origen de mármoles ornamentales. El PROZOM viene a establecer las opciones estratégicas, el modelo territorial y las normas orientadoras, que desde una óptica supramunicipal, tienen como objetivo el ordenamiento y la racionalización de la explotación de recursos de mármol, así como el establecimiento de reglas para la instalación de actividades ligadas al tratamiento y transformación o la gestión de estériles. Se definieron en primer lugar cinco unidades de ordenamiento (UNOR) sobre las que se realizaron cartografías de detalle (a escala 1:5000) a partir de los resultados de un trabajo previo de cartografía temática (Sobreiro *et al.*, 2003; Midões *et al.*, 2006). Cada una de las unidades en que se dividió el territorio afectado abarcaba uno o más núcleos de canteras y su delimitación tuvo en cuenta la intensidad de explotación y los diferentes grados de sensibilidad ambiental existentes en la región, como pueden ser la proximidad a núcleos urbanos y vías de comunicación principales o la existencia de importantes valores ecológicos y arqueológicos (Falé *et al.*, 2006). La metodología general se estructuró en cuatro etapas. La primera fase llevó a obtener el denominado Mapa de Riesgo Geoeconómico a escala 1:5000, basado en la aptitud del territorio para la producción de rocas ornamentales, sobre la base de indicadores de índole geológica. Los estudios geológicos de detalle realizados permitieron delimitar y agrupar por semejanzas los distintos tipos de mármol, discernir rigurosamente la estructura geológica y el estado de fracturación, para definir finalmente áreas de diferente potencial geológico-minero. Una segunda etapa culminó con la realización de Mapas de Sensibili-

dad Ambiental. La tercera etapa proporcionó Mapas de Exclusión. La cuarta culminó con los Mapas de Reordenamiento, en los que se plasmaron las propuestas de afección del espacio territorial en función del cruce de la información obtenida en etapas anteriores en una matriz de doble entrada (Falé *et al.*, 2006; Midões *et al.*, 2006). La idea es que las zonas más favorables para la explotación por su mayor aptitud (bajo riesgo geoeconómico) y donde se dan menores condicionantes derivados de una baja sensibilidad ambiental son las óptimas para la localización de las explotaciones. Igualmente, las áreas reconocidas como sin interés para la explotación y baja sensibilidad ambiental se orientan a sustentar las actividades complementarias de la industria extractiva. El Riesgo Geoeconómico es pues el indicador que sirve para evaluar el potencial de los recursos mineros. En su definición se tuvieron en cuenta una serie de criterios para determinar en qué medida un determinado litotipo puede eventualmente ser aprovechado para fines ornamentales. Dichos criterios fueron la litología, la estructura geológica y el estado de fracturación. La litología permite distinguir las áreas donde existen mármoles y clasificarlas en función de su grado de pureza y color. El análisis de la cartografía geológica, conjugada con el conocimiento geológico-minero adquirido sobre la región permitieron establecer tres clases de aptitud relativa a la litología (L), y una puntuación asociada: buena (0), media (3) y mala (5), en función del tipo color del mármol y el grado de veteado y brechificación. Las áreas sin mármol se clasificaron como sin aptitud (20). En lo que respecta al indicador estructura geológica (EG), la disposición de las unidades litológicas es también factor condicionante de su explotabilidad. Así, del análisis estructural se consideró relevante la evaluación de la existencia de zonas de charnela de pliegues anticlinales o de flancos normales o inversos, así como la dolomitización asociada al plegamiento. Según estos aspectos se distinguieron cuatro grados de aptitud; buena (1), media (5), mala (10) y no aplicable (20), esta última para zonas sin recursos. El indicador llamado fracturación (F) es valorado con base en los resultados de un tratamiento geoestadístico basado en el trabajo de Luís y Sousa (1998). Los datos fueron tomados de forma representativa al largo de todo el área en estudio, en canteras activas e inactivas y en sondeos, utilizando los intervalos definidos en el análisis de la densidad lineal de fracturación (que representa el número de fracturas por metro lineal). Este parámetro se valoró reconociendo cinco grados: zona poco fracturada (2), zona medianamente fracturada (4), zona muy fracturada (6), zona no estimada (6) y no aplicable (20). Las zo-

nas no estimadas son aquellas que no pudieron ser reconocidas y la clase no aplicable se refiere a zonas sin mármoles. Mediante tratamiento SIG, se calcularon los valores del Riesgo Geoeconómico (RGE), como suma de los anteriores tres parámetros, resultando: bajo riesgo (para valores de RGE entre 3 y 7), medio riesgo (para valores de RGE entre 7 y 12), alto riesgo (para valores de RGE entre 12 y 21) y sin interés (para valores de RGE entre 21 y 60). Las zonas que corresponden a las clases de bajo y medio Riesgo Geoeconómico son aquellas que preferentemente han de destinarse a la explotación del recurso, salvo que en el cruce con los valores de sensibilidad ambiental resulte desaconsejable. Las zonas clasificadas con alto riesgo indican que, en términos de litología, estructura y fracturación no son recomendables para la exploración del recurso minero.

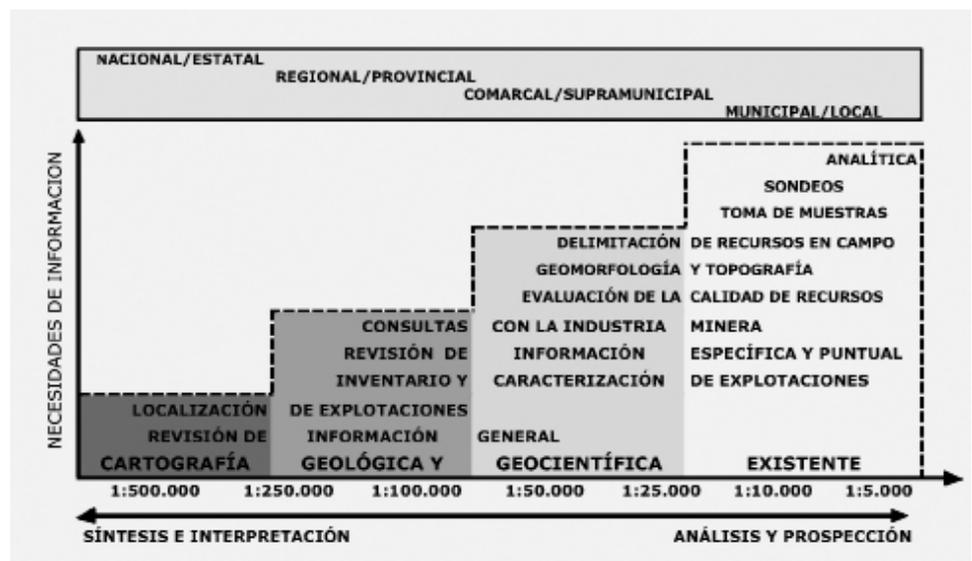
### Escalas de trabajo y proyectos de planificación de la actividad minera

Mattig (1992) remarcaba la importancia de recopilar y sobre todo interpretar la información geológica para convertirla en útil de cara a la planificación, ya sea por si sola o en combinación con información de otro tipo. Cuando se trata de enfocar la planificación a los recursos minerales, es evidente que los mapas geológicos son la base fundamental de información. En este sentido, en aquellos lugares en los que existe una buena infraestructura de cartografía geológica y la escala de los trabajos de planificación sean de igual o inferior detalle, puede ser suficiente una interpretación o traducción de la geología para

obtener la delimitación de los recursos geológico-mineros potenciales. Igualmente, los mapas de recursos minerales que muchos servicios geológicos producen más o menos sistemáticamente pueden ser también una base excelente para trabajos de planificación. Sin embargo, raro es encontrar ese tipo de mapas a escalas mayores de 1:100 000. Cendrero (1988) apuntaba que el nivel de planificación que él denominó "meso" (trabajando con escalas entre 1:25 000 y 1:200 000), es el idóneo para definir áreas aptas para la localización de actividades y establecer las capacidades del territorio. Buena parte de los trabajos que se han revisado se encuentran entre esos niveles de detalle. Sin embargo, se ha podido apreciar una tendencia general a enriquecer la simple delimitación de los recursos potencialmente explotables, introduciendo valoraciones sobre la calidad del yacimiento o del recurso, especialmente en los trabajos realizados a escala más detallada. La Figura 3 intenta relacionar de forma esquemática en qué medida la escala cartográfica de los trabajos de ordenación influye sobre las necesidades de información geológico-minera apropiadas al grado de detalle elegido para abordar la ordenación territorial de la actividad minera. Conviene advertir que la terminología de divisiones territoriales es orientativa y debe entenderse en sentido laxo, puesto que, yendo de lo nacional a lo municipal, la terminologías intermedias pueden variar según los países, por su tamaño y por las particulares denominaciones de las subdivisiones administrativas: departamental, distrital, comunal, etc.

A la luz de los trabajos revisados, se ha podido observar que la determinación de los componentes

**Figura 3.** Representación gráfica de la relación entre las necesidades de información geológica y minera y la escala de los mapas de planificación. *Figure 3.* Graphic representation of the relation between necessity for geological and mining information and the scale of planning maps.



que definen la aptitud o potencial de una unidad territorial, cuadrícula o punto del territorio para la actividad extractiva, además de la información geológica, se beneficia siempre del inventario y caracterización técnica de las explotaciones existentes en el territorio, y de la consulta con personal experto, entrenado en la geología de la zona o ligado a la industria extractiva existente. Además de esto, cuando el nivel de detalle iguala o supera al de la cartografía geológica editada o de fácil acceso, se amplía la búsqueda de documentación, lo que puede ocupar una importante cantidad de tiempo y recursos. En ocasiones, el proyecto de planificación se ha desarrollado a continuación de un proyecto de cartografía geológica o de recursos específico para el territorio de interés, o ha incluido labores de prospección geológica para mejorar el detalle cartográfico general o de zonas concretas, sobre todo cuando el proyecto de planificación se plantea a una escala muy grande (supramunicipal, municipal o local). De hecho, cuando se trata de proyectos de ordenación

minero-ambiental, en los cuales se evalúan otros elementos del medio, puede ser necesario destinar parte del presupuesto económico a mejorar la información del inventario, a actualizarla o a homogeneizarla en cuanto al detalle cartográfico (Arranz-González y Alberruche del Campo, 2008). También se ha visto que al aumentar el nivel de detalle, se tiende a usar fórmulas de agregación sistemáticas (sumas ponderadas) que relacionan indicadores basados en parámetros de calidad y cantidad (litología, espesor, recubrimiento, parámetros estructurales, granulometría, etc.), incorporando en ocasiones otros condicionantes de la explotabilidad, tales como: pendiente, altitud o distancia a los núcleos de consumo. Los elementos de valoración del potencial geológico-minero se reúnen en la Tabla 1, en un intento de destacar aquellos parámetros característicos del yacimiento y la localización que se han mostrado de mayor utilidad, distinguiendo entre productos de cantera para materiales de construcción, rocas ornamentales y áridos naturales.

Tipo de Recurso	Recurso	Incidencia en el potencial geológico-minero	Referencias
<b>Arenas y gravas naturales</b>	<i>Propiedades del material</i>		
	Contenido en gravas	++	Scott (1984), Schenk (1993), Letouzé-Zezula (1993), Letouzé-Zezula et al. (1996) Hernández-Durán (2000), Colegial-Gutiérrez (2004), Wrighton, et al. (2011), Wrighton and Humpage (2012), IGME (2009), Arranz González et al. (2009)
	Porcentaje de finos	+++	
	Características técnicas	+	
	<i>Propiedades del yacimiento</i>		
	Extensión	++	
	Espesor	+++	
	Espesor del recubrimiento	--	
Grado de cementación	-		
Posición del nivel freático	+/-		
<b>Productos de cantera para la construcción</b>	<i>Propiedades del material</i>		
	Características técnicas	++	Letouzé-Zezula (1993), ITGE (1996), Letouzé-Zezula et al. (1996), Hernández-Durán (2000), INGEOMINAS (2000), Molina (2001), Sánchez y Cárdenas (2001) Loayza y Carrión (2003), Ladines y Carrión (2007)
	<i>Propiedades del yacimiento</i>		
	Continuidad litológica	+++	
	Espesor	++	
	Espesor del recubrimiento	-	
	Complejidad estructural	-	
	<i>Topografía</i>		
Pendiente	-		
Altitud	-		

**Tabla 1.** Parámetros empleados en estudios de planificación de la actividad extractiva de rocas industriales para valorar la aptitud o potencial geológico-minero.

**Table 1.** Parameters used in planning studies for extraction of industrial rocks to assess the aptitude or geo-mining potential.

Tipo de Recurso	Recurso	Incidencia en el potencial geológico-minero	Referencias
Rocas ornamentales	<i>Propiedades del material</i>		
	Características técnicas y estéticas	+++	
	<i>Propiedades del yacimiento</i>		
	Continuidad litológica		ITGE (1990), IGME. 1995Barettino et al.
	Fracturación, diaclasado	++	(1994), Barettino (2002), Hernández-Durán (2000), Sobreiro et al. (2003),
	Espesor del recubrimiento	+++	Falé et al. (2006),
	Complejidad estructural	-	
	<i>Topografía</i>		
	Pendiente	--	
	Altitud	-	

**Tabla 1.** Parámetros empleados en estudios de planificación de la actividad extractiva de rocas industriales para valorar la aptitud o potencial geológico-minero.

**Table 1.** Parameters used in planning studies for extraction of industrial rocks to assess the aptitude or geo-mining potential.

## Conclusiones

Una revisión de trabajos, realizados a escalas que van desde el ámbito regional al local o municipal, han permitido conocer cómo ha sido abordada la necesidad de delimitar y evaluar los recursos mineros como paso previo a la planificación territorial de la actividad minera. Se concluye que no existe una manera universal para abordar esta cuestión, pues influyen muchos aspectos particulares en cada proyecto que condicionan y ponen a prueba a los equipos de trabajo (particularidades del medio y del recurso minero, información existente, escala, etc.). Sin embargo, se observa una tendencia clara a emplear conceptos como aptitud o potencial geológico-minero, que intentan mejorar la simple delimitación de las formaciones geológicas que albergan los recursos y son de gran utilidad para afrontar la planificación mediante la valoración de la capacidad de acogida. Finalmente, la investigación geológico-minera constituye uno de los pilares básicos sobre los que se sustenta la ordenación minero-ambiental o cualquier esfuerzo de planificación territorial centrado en los recursos minerales, lo que resalta la importancia de una infraestructura de conocimiento geológico lo más detallada posible, en especial para las escalas más detalladas.

## Agradecimientos

Los autores quieren expresar su agradecimiento al profesor José Antonio Espí por sus comentarios y sugerencias.

## Referencias

- Arranz González, J.C. y Alberruche del Campo, E. 2008. *Minería, medio ambiente y territorio*. Monografías del Máster Internacional Aprovechamiento sostenible de los recursos minerales. UE/Programa Alfa II-0459-FA. Red DESIR. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid. 96pp.
- Arranz González, J.C., Alberruche del Campo, E. y Trapote Redondo, M.M. 2009. Metodología para la ordenación minero-ambiental de los recursos de áridos naturales. Aplicación a la ribera occidental del Ebro en Navarra. // *Congreso Nacional de Áridos*, Valencia, 491-495.
- Barettino, D., Arranz-González, J.C., Martínez-Plédel, B. y Alberruche, E. 1994. Ordenación Minero-Ambiental del yacimiento de pizarra de La Cabrera (León). *IX Congreso Internacional de Minería y Metalurgia*, León, Tomo I, 509-532.
- Barettino, D. 2002. Ordenación Minero-Ambiental de recursos de rocas industriales. Aplicación a la reserva estatal de pizarras de La Cabrera (León). Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. Inédito. 267 pp.
- Barettino, D. Martínez Plédel, B. Arranz-González, J.C. y Alberruche, E. 2003. Las bases para la integración de los recursos minerales en la ordenación del territorio: el Mapa de Ordenación Minero-Ambiental. In: L. Martins y Paúl Carrión (eds.). *Integración de la Minería en la Ordenación del Territorio*. Centro de Investigación Científica y Tecnológica, Guayaquil, 139-152.
- Bates, R.L. 1969. *Geology of the industrial rocks and minerals*. New York, Dover Publications Inc., 459 pp.
- Bauer, A.M., 1993, Land use–conflicts and resolutions: Integrating aggregate mining into the planning process. In Sidder, G.B., Sims, P.K. (eds.). *Industrial minerals-Today and Tomorrow: The raw materials to build the upper Midwest*, Minnesota Geological Survey Report of Investigations, 42, 42-47.

- Becker-Platen, J.D., Dom, M., and Look, E.R. 1987. An introduction to the legend of the Geoscientific Map of the Natural Environment's Potential (GMNEP) of Lower Saxony and Bremen. In: Amtdt, P. and Lüttig, G.W. (eds.): *Mineral resources' extraction, environmental protection and land-use planning in the industrial and developing countries*. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 119-126.
- Calvo, B. 2000. Las rocas y minerales industriales como elemento de desarrollo sostenible. In: Calvo, B., Gajardo, A. y Maya, M. (eds.). *Rocas y minerales industriales de Iberoamérica*. ITGE, Madrid, 17-32.
- Castiella J., Solé, I., Niñerola y Otamendi A. 1982. *Las Aguas Subterráneas en Navarra (Proyecto Hidrogeológico)*. Dirección de Obras Hidráulicas, Servicio Geológico, Diputación Foral de Navarra, Pamplona, 229 pp.
- Cendrero, A. 1975. El mapa geológico-ambiental en la evaluación de los recursos naturales y en la planificación del territorio. Su aplicación a la zona de Santander y su bahía. Universidad de Santander, Secretariado de Publicaciones. Santander, 188 pp.
- Cendrero, A. 1988. Planificación ambiental y ordenación de usos del territorio. In IGME: Geología ambiental. Publicaciones del IGME, Madrid, 25-32.
- Cendrero, A. y J. R. Díaz de Terán. 1987. The environmental map system of the University of Cantabria, Spain. In: Arnol, P. and Luttig, G.W. (eds.). *Mineral Resources extraction, Environmental Protection and Land-use Planning*. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 149-181.
- Chambers, D.M. 1985. The use of mineral resource information for mineral planning on national forest lands (Management, policy, exploration, locatable). Ph.D. Dissertation University of California. Berkeley. Vol. 46/09-b.
- Colegial Gutiérrez, J.D. 2004. Evaluación Multicriterio para la Ordenación Minero-Ambiental de Áridos Naturales en la Cuenca del Río Jarama (Madrid). Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid, Madrid. Inédito.
- Crimes, T., Chester, D., Hunt, N., Lucas, G., Mussett, A., Thomas, G., y Thompson, A. 1994. Techniques used in aggregate resource analyses of four areas in the UK. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 27(2), 165-192.
- Falé, P., Henriques, P., Midões, C., Carvalho, E.J. 2006. O reordenamiento da actividades extractiva como instrumento para planeamiento regional: Vila Viçosa, Portugal. *Boletín Geológico y Minero*, 117, 277-288.
- García Cortés, A., Arranz, J.C., Marchán, C., Martínez-Plédel, B., Muñoz de la Nava, P. Regueiro, M. y Rubio, J. 2006. Un plan nacional de áridos. Necesidad inaplazable. *I Congreso Nacional de Áridos*, Zaragoza, 517-530.
- Gómez Orea, D. 1994. *Ordenación del territorio: una aproximación desde el medio físico*. Instituto Tecnológico Geominero de España-Editorial Agrícola Española, S.A. Madrid, España. 238 pp.
- Heinrich, M., Letouzé-Zezula, G. y Pirkl, H. 1994. Mineral Resources vs. Environment Conservation: Towards a Lower Conflictivity. 2<sup>nd</sup> *Agglomerates Symposium at Erlangen/FRG 1990*. International Union for Quaternary Research.
- Hernández-Durán, G. 2000. *Plan especial de Ordenación de la actividad extractiva. Granadilla de Abona, Santa Cruz de Tenerife, Islas Canarias*. Informe inédito. 134 pp.
- IGME. 1995. Ordenación minero-ambiental del yacimiento de pizarras ornamentales de La Cabrera (León). Informe inédito. Servicio de Documentación del IGME. Madrid. 7 tomos.
- IGME. 2009. Ordenación Minero-Ambiental del sector de los áridos en la zona occidental de la ribera del Ebro (Navarra). Informe inédito. Servicio de Documentación del IGME. Madrid. 5 tomos.
- INGEOMINAS. 2000. Estudio básico para la Conformación de un Parque Minero Industrial para el Ordenamiento y Desarrollo de la Actividad Extractiva y Transformadora de Minerales Arcillosos con Fines a la Desmarginalización de Barrios en el Distrito Capital. Proyecto PNUD/DAMA-COL-96-023, Informe 2445.
- INTERRA. 2007. Mapa de compatibilidad Minero-Ambiental de La Rioja. Gobierno de La Rioja, Dirección General de Política Territorial. 241 pp.
- ITGE. 1990. Investigación de pizarras en la Reserva Estatal "Sinclinal de Truchas" (León). Informe inédito. Servicio de Documentación del IGME. Madrid.
- ITGE. 1995. *Libro Blanco de la Minería de la Comunidad de Madrid*. ITGE-Consejería de economía de la Comunidad de Madrid, Madrid, 284 pp.
- ITGE. 1996. *Potencial minero de áridos en la Comunidad de Madrid*. ITGE. Informe inédito. Servicio de Documentación del IGME. Madrid. 145 pp.
- Ladines, L. y Carrión, P. 2007. Ordenación minero-ambiental de los recursos minerales no metálicos y su influencia en el medio ambiente, sector noroeste de Guayaquil, Ecuador. *Revista Tecnológica ESPOL Ciencia*, 20(1), 105-113.
- Langer, W.H. 2002. *Managing and Protecting Aggregate Resources*. USGS, Open-File Report 02-415. 15 pp.
- Langer, W. H., Lindsey, D.A. and Knepper Jr, D.H. 2002. Geologic information for aggregate resource planning. In: Fabbri, A.G., Gaal, G. and McCammon, R.B.(eds.). *Deposit and Geoenvironmental Models for Resource Exploitation and Environmental Security*. 1998 Proceedings of the NATO Advanced Study Institute. Matrahaza, Hungary (NATO Science Partnership Sub-Series: 2). Springer Science Bussiness Media, 135-150.
- Letouzé-Zezula, G. 1993. La aplicación del sistema Arc/Info® en la evaluación del nivel de protección de los recursos minerales. In: Ortiz-Silla, R (ed.). *Problemática Geoambiental y Desarrollo. V Reunión Nacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio*, Murcia, Tomo II, 719-726.
- Letouzé-Zezula, G., Koçiu, A., Lipiarski, P., Pfleider, S. y Reitner, H. 1996. GIS-Applications in order to protect aggregate resources by land use planning. Sociedad Española de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio. *VI Congreso Nacional y Conferencia Internacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio*, Tomo 2, 103-109.
- Loayza, G. y P. Carrión, P. 2003. Metodología de la Ordenación Minero-Ambiental. Casos de aplicación: Península de Santa Elena y sector Zaruma-Portovelo (Ecuador). *Revista Tecnológica ESPOL Ciencia*, edición especial, pp. 257-269.

- Luaces Frades, C. y Gómez Sánchez. 2009. Compatibilidad entre explotaciones de áridos y la red Natura 2000. // *Congreso Nacional de Áridos*, Valencia, 403-409.
- Luís, A.G. e Sousa, A.J. 1998. Simulação Geoestatística de Redes de Fracturas Aplicação à Avaliação da Blocometria de um Jazigo de Mármore, *Comunicacoes Instituto Geológico e Mineiro*, Lisboa, Tomo 85, 117-137.
- Lüttig, G.W. 1979. Mapas geocientíficos como base para el análisis del medio natural. *Tecniterrae*, 33, 59-62.
- Lüttig, G.W. 1982. Contributions of geoscientific cartography to the solution of conflicts arising from utilization of natural resources and protection of the environment. In: Fisher, W.B. and Kent, P.W. (eds.) *Resources environment and the Future*. German Academic Exchange service, London, 203-227.
- Lüttig, G.W. 1987a. Approach to the problems of mineral resources extraction, environmental protection and land-use planning in the industrial and developing countries. In: Arndt, P. and Lüttig, G.W. (eds.). *Mineral resources extraction, environmental protection and land-use planning in the industrial and developing countries*. E. Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 7-13.
- Lüttig, G.W. 1989. Potential and future prospects-Earth Science mapping for rational management of natural resources and the environment. In : McCall, J. and Marker, B (eds). *Earth science mapping for planning, development and conservation*, Graham and Trotman, London, 237-248.
- Lüttig, G.W. 1990. Quaternary research in view of modern requirements of applied geology. *Striae* 29, 15-29.
- Mattig, U. 1992. Geoscientific Maps for Land-Use Planning-a Review. In: Cendrero, A. Lüttig, G.W. and F. Wolff, F. (eds.) *Planning the Use of the Earth's Surface*. Lecture Notes in Earth Sciences 42, Springer, Berlin, 49-83.
- Martínez Plédel, B., Arranz, J.C. Alberruche, E. y Baretino, D. 2006. Los proyectos de ordenación minero-ambiental de las rocas y minerales industriales. Algunos casos en España. *Boletín Geológico y Minero*, 117 (2), 305-316.
- McEvoy, F.M., Cowley, J. Hobben, K. Bee, E. and Harris; S. 2007. *A guide to mineral safeguarding in England*. British Geological Survey Commissioned Report, CR/07/060, 36 pp.
- Midões, C., Falé, P., Henriques, P., Vintém, C. 2006. Alguns indicadores geológicos e ambientais indispensáveis ao reordenamento da actividade extractiva: o caso do Anticlinal de Estremoz. *VIII Congresso Nacional da Água*, 13-17.
- Molina, J.M. 2001. Los recursos minerales y la minería como componente del medio físico en la planificación territorial en Colombia. Enfoque conceptual y metodológico In: Villas-Bôas, R. y Page, R. (eds.). *La Minería en el Contexto de la Ordenación del Territorio*. CNPq/CYTED XIII. Río de Janeiro, 171-195.
- Sánchez, M.E. y Cárdenas, J.F. 2001. Lineamientos de ordenamiento ambiental territorial y la minería. Caso de estudio Parque Minero Mochuelo Bogotá Colombia. In: Villas-Bôas, R. y Page, R. (Eds.). *La Minería en el Contexto de la Ordenación del Territorio*. CNPq/CYTED XIII. Río de Janeiro, 106-124.
- Schenk, C.J. 1993. A regional approach to evaluating aggregate needs. Sidder, G.B., Sims, P.K. (eds.). *Industrial minerals-Today and Tomorrow: The raw materials to build the upper Midwest*. Minnesota Geological Survey Report of Investigations, 42, 77-90.
- Scott D.W. 1984 Aggregate resources inventory in Ontario. Canada. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 29,107-15.
- Sobreiro, S., Carvalho, J., Vintém, C., Henriques, P., Falé, P., Saúde, J., Midões, C., Luís, G., Bonito, N., Antunes, C., Dill, A e Martins, L. 2003. Recursos Minerais e o Ordenamento do Território - o caso do Anticlinal de Estremoz. *V Congresso Internacional da Pedra Natural do Alentejo*, Vila Viçosa. 10 p.
- Stenestad, E. and Sustrac, G.1994. The role of geoscience in planning and development. In: Lumsden, G.I. (ed.): *Geology and the Environment in Western Europe*. Oxford Academic Press, London, 281-301.
- Velásquez, E. 1997. Sobre la consideración del medio físico en el Ordenamiento Ambiental y Territorial en Colombia. *Boletín Ambiental*, XXXVII, IDEA, 5p.
- Velásquez, E. 2004. Aspectos conceptuales de la evaluación del geopotencial con fines de planificación territorial. *Cuadernos de Geografía*, 13,103-144.
- Wrighton, C.E., McEvoy, F.M. and Bust, R. 2011. *Mineral safeguarding in England: good practice advice*. British Geological Survey Open Report OR/11/046. 53pp.
- Wrighton, C.E. and Humpage, A.J. 2012. *Aggregates Safeguarding Maps of Wales*. British Geological Survey Commissioned Report CR/12/039, 20 pp.
- Zoido, F. 1998. Geografía y ordenación del territorio. *Íber, Didáctica de las ciencias sociales. Geografía e Historia*, 16, 19-31.

Recibido: febrero 2014

Revisado: abril 2014

Aceptado: agosto 2014

Publicado: diciembre 2014