



# Geobase de datos para el análisis y diagnóstico de los recursos minerales y energéticos de Aragón en un contexto de sostenibilidad y competencia global

Iván Polo Pérez



## CONSEJO ECONÓMICO Y SOCIAL DE ARAGÓN

### COLECCIÓN TESIS DOCTORALES

Premio a tesis doctorales 2020

Autor de la tesis doctoral:

Iván Polo Pérez

Directora de la tesis:

Dra. Ana I. Escalona Orcao

Calificación obtenida:

Sobresaliente *cum laude*

La responsabilidad por las opiniones expresadas en las publicaciones del Consejo Económico y Social de Aragón incumbe exclusivamente a sus autores y su publicación no significa que el Consejo se identifique con las mismas.

2021

© De esta edición digital: Consejo Económico y Social de Aragón.

© Para otras ediciones: el autor.

Esta publicación se edita únicamente en formato digital.

Foto de la portada: Minas de Ojos Negros. Mina Menerillo, 2000. Diego Arribas Navarro

Consejo Económico y Social de Aragón

c/ Joaquín Costa, 18, 1º

50071 Zaragoza (España)

Teléfono: 976 71 38 38 – Fax: 976 71 38 41

[cesa@aragon.es](mailto:cesa@aragon.es)

[www.aragon.es/cesa](http://www.aragon.es/cesa)

## **Premio del Consejo Económico y Social de Aragón 2020 a tesis doctorales**

El Consejo Económico y Social de Aragón, con el fin de promover y divulgar la investigación, convoca anualmente Premio a tesis doctorales, en cuya convocatoria del año 2020, efectuada por Resolución de 6 de julio de 2020, de la Presidencia del Consejo Económico y Social de Aragón (*Boletín Oficial de Aragón* número 139, de 15 de julio de 2020), pudieron participar los autores de trabajos de tesis doctorales presentadas para la colación del grado de doctor leídas y calificadas de sobresaliente *cum laude*, por unanimidad, entre el 16 de septiembre de 2019 y el 30 de septiembre de 2020.

Por Resolución de 5 de diciembre de 2018, de la Secretaría General Técnica de la Presidencia (*Boletín Oficial de Aragón* número 256, de 29 de diciembre de 2020), se otorgó el premio del Consejo Económico y Social de Aragón 2020 a tesis doctorales.

El premio, con una dotación económica de 3.000 euros, se otorgó a la tesis doctoral *Geobase de datos para el análisis y diagnóstico de los recursos minerales y energéticos de Aragón en un contexto de sostenibilidad y competencia global*, realizada por D. Iván Polo Pérez.

La Comisión de Valoración, que propuso por unanimidad la concesión del Premio, estuvo compuesta por los siguientes miembros del Consejo:

**Presidente:** D. José Manuel Lasierra Esteban

**Secretaria:** D.ª Pilar Ventura Contreras

**Vocales:** D.ª Isabel Artero Escartín

D. José de las Morenas de Toro

D. José Calvo Palacín

# Índice

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	5
ÍNDICE DE FIGURAS .....	16
ÍNDICE DE TABLAS .....	34
<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>37</b>
INTRODUCCIÓN. MOTIVACIÓN PERSONAL, OPORTUNIDADES, OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DE LOS CONTENIDOS .....	38
1.1. MOTIVACIÓN PERSONAL .....	39
1.2. OPORTUNIDADES .....	42
1.2.1. Temática .....	42
1.2.2. Contexto Académico .....	45
1.2.3. Contexto Institucional .....	47
1.3. OBJETIVOS .....	48
1.4. ESTRUCTURA DE LOS CONTENIDOS .....	52
1.5. AGRADECIMIENTOS .....	54
<b>CAPÍTULO I (ITALIANO) .....</b>	<b>58</b>
INTRODUZIONE. MOTIVAZIONI PERSONALI, OPPORTUNITÀ, OBIETTIVI E STRUTTURA DEI CONTENUTI .....	59
1.1. MOTIVAZIONI PERSONALI .....	60
1.2. OPPORTUNITÀ .....	63
1.2.1. Introduzione alla tematica .....	63

1.2.2. Contesto accademico .....	66
1.2.3. Quadro istituzionale .....	68
1.3. OBIETTIVI DELLA TESI .....	68
1.4. STRUTTURA DEI CONTENUTI .....	72
1.5. RINGRAZIAMENTI.....	74
<b>CAPÍTULO II .....</b>	<b>77</b>
<b>INTERÉS DE LA CUESTIÓN: LAS DIMENSIONES CLAVE DE UNA MINERÍA SOSTENIBLE Y DE SU ANÁLISIS EN UN CONTEXTO DE COMPETENCIA GLOBAL.....</b>	<b>78</b>
2.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA COMUNIDAD AUTÓNOMA DE ARAGÓN.....	80
2.1.1. Características geográficas .....	80
2.1.2. Historia minera del territorio aragonés .....	83
2.1.3. El sector minero aragonés en la actualidad .....	85
2.2. MINERÍA: CARACTERÍSTICAS Y PECULIARIDADES .....	88
2.2.1. Características de la minería y la explotación de aguas .....	90
2.2.1.1. Escombreras y balsas.....	94
2.2.1.2. Impactos ambientales .....	96
2.2.1.3. Impactos sociales y económicos de los proyectos mineros.....	106
2.2.2. Fractura hidráulica .....	113
2.2.2.1. Principios de la formación de los hidrocarburos.....	113
2.2.2.2. Hidrocarburos convencionales y no convencionales .....	116
2.2.2.3. Proceso de extracción de hidrocarburos mediante fractura hidráulica ...	121

2.2.2.4. Impactos del proceso de fractura hidráulica.....	122
2.3. LA MINERÍA SOSTENIBLE. PROBLEMÁTICA Y DEBATE .....	126
2.3.1. Desarrollo sostenible.....	128
2.3.2. La minería ¿una actividad intrínsecamente insostenible? .....	129
2.3.3. <i>Elementos de una minería sostenible</i> .....	130
2.3.4. Evaluación de Impacto Ambiental .....	134
2.3.5. Medidas correctoras para la mitigación de los impactos ambientales derivados de la actividad minera.....	135
2.4. DESAFÍOS DE LA COMPETENCIA GLOBAL POR EL ACCESO A LOS RECURSOS MINEROS.....	138
2.4.1. Las bases del conflicto.....	139
2.4.2. La República Popular China y la revolución de los mercados.....	142
2.4.3. Minerales estratégicos .....	144
2.4.4. Elementos críticos para la Unión Europea .....	147
2.4.5. La geopolítica de los hidrocarburos: el caso del <i>fracking</i> .....	154
2.5. IMPLICACIONES METODOLÓGICAS PARA LA TESIS .....	158
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>162</b>
<b>ELEMENTOS Y ÁMBITO DE ESTUDIO .....</b>	<b>163</b>
3.1. CONSIDERACIONES PREVIAS.....	164
3.1.1 Recursos vs. reservas .....	164
3.1.2. Origen de los recursos minerales.....	167

3.1.3. Clasificación de los recursos minerales.....	169
3.2. METODOLOGÍA PARA LA GENERACIÓN DE LA BASE DE DATOS DE LOS RECURSOS MINERALES, ENERGÉTICOS Y AGUAS DE ARAGÓN. FUENTES MANEJADAS Y TRATAMIENTOS .....	171
3.2.1 Fuentes de información empleadas en la elaboración del inventario .....	172
3.2.2. Criterios de unificación de los datos inventariados.....	185
3.2.3. El tamaño de las explotaciones mineras y sus implicaciones metodológicas .	191
3.3. ELEMENTOS DEL ESTUDIO: PRESENTACIÓN SISTEMÁTICA DE LOS RECURSOS CONSIDERADOS .....	194
3.3.1. Aguas.....	198
3.3.2. Rocas industriales, minerales industriales y rocas ornamentales .....	201
3.3.3. Minerales metálicos .....	214
3.3.4. Recursos energéticos .....	217
3.3.5. Hidrocarburos no convencionales .....	221
3.3.6. Elementos críticos en la C.A. de Aragón .....	234
3.4. ÁMBITO DE ESTUDIO: CARACTERÍSTICAS AMBIENTALES Y SOCIOECONÓMICAS DEL TERRITORIO.....	242
3.4.1. Características ambientales del territorio para el estudio de la dimensión <i>Aptitud del terreno</i> .....	243
3.4.1.1. Estructura del relieve e implicaciones en la adecuación topográfica (litología y pendientes).....	243
3.4.1.2. Drenaje ácido de mina en el contexto regional aragonés.....	259

3.4.1.3. Hidrografía, canalizaciones de agua y acuíferos .....	262
3.4.1.4. Riesgos Geológicos y Climáticos.....	267
3.4.2. Características sociales, económicas y ambientales para el estudio de la dimensión <i>Inserción socioeconómica</i> .....	284
3.4.2.1. Características demográficas y económicas del territorio aragonés .....	284
3.4.2.2. Parcelación del territorio.....	291
3.4.2.3. Redes de transporte de personas y mercancías, de electricidad y de combustible.....	293
3.4.2.4. Distribución de las masas boscosas y de los usos del suelo.....	300
3.4.2.5. Figuras de protección del patrimonio natural y cultural.....	305
3.4.2.6. Características del paisaje .....	315
<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>319</b>
<b>LA GEOBASE DE DATOS: ELEMENTOS Y DISEÑO DEL ANÁLISIS MULTICRITERIO, POSIBILIDADES Y CRITERIO DE MANEJO DE LOS DIVERSOS INDICADORES.....</b>	<b>320</b>
4.1. INTRODUCCIÓN: ANÁLISIS MULTICRITERIO EN GEOLOGÍA. PRINCIPIOS Y APLICACIONES.....	321
4.2. ELEMENTOS DEL ANÁLISIS MULTICRITERIO .....	323
4.3. PERFIL GEOLÓGICO .....	326
4.3.1. Actividad.....	328
4.3.2. Tamaño.....	330
4.3.3. Forma de aparición del mineral en el yacimiento .....	332
4.3.4. Recursos minerales asociados.....	333

4.3.5. Valor estratégico del elemento explotable.....	334
4.3.6. Análisis del <i>TOC</i> : contenido en carbono orgánico .....	337
4.4. APTITUD DEL TERRENO .....	339
4.4.1. Adecuación topográfica .....	340
4.4.2. Capacidad de recarga de los acuíferos.....	345
4.4.3. Generación y difusión del drenaje ácido de mina y otros tipos de contaminantes .....	348
4.4.4. Vulnerabilidad frente a eventos naturales extremos .....	351
4.5. INSERCIÓN SOCIOECONÓMICA.....	353
4.5.1. Régimen de propiedad del terreno.....	357
4.5.2. Acceso a las infraestructuras .....	360
4.5.3. Impacto potencial en la economía local .....	365
4.5.4. Nivel de exposición de los núcleos de población.....	371
4.5.5. Afectaciones de los bosques y de la cubierta vegetal .....	373
4.5.6. Restricciones por figuras de protección.....	374
4.5.7. Afectaciones del paisaje.....	377
4.6. DISEÑO DEL ANÁLISIS MULTICRITERIO .....	381
<b>CAPÍTULO V.....</b>	<b>387</b>
<b>HERRAMIENTAS PARA LA GENERACIÓN, ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE LA BASE DE DATOS.....</b>	<b>388</b>
5.1. El SIG .....	389

5.1.1. Modelos de datos.....	389
5.1.2. Herramientas de análisis espacial y geoprocésamiento .....	391
5.1.3. Exportación de los resultados .....	391
5.2. DATOS Y TRATAMIENTOS CARTOGRÁFICOS ADICIONALES PARA EL ANÁLISIS DE LAS DIMENSIONES <i>APTITUD DEL TERRENO</i> E <i>INSERCIÓN SOCIOECONÓMICA</i> .....	392
5.2.1. Tratamientos para indicadores de la dimensión <i>Aptitud del terreno</i> .....	393
5.2.1.1. Digitalización de información disponible en formato de imagen .....	393
5.2.1.2. Análisis topológicos .....	395
5.2.1.3. Simplificación de la información .....	396
5.2.1.4. Unión de información en formato tipo ráster y generación de subproductos.....	396
5.2.2. Tratamientos para indicadores de la dimensión <i>Inserción socioeconómica</i> ...	397
5.2.2.1. Unión de datos vectoriales .....	398
5.2.2.2. Actualización de los datos existentes.....	399
5.2.2.3. Generación de un Dataset de Red (Network Dataset).....	401
5.3. HERRAMIENTAS AUXILIARES PARA LA AUTOMATIZACIÓN DE LOS ANÁLISIS Y SU EXPORTACIÓN A OTROS CONTEXTOS GEOGRÁFICOS .....	403
5.3.1. Herramienta para el cálculo del <i>Impacto potencial en la economía local</i> .....	406
5.3.2. Herramienta para el cálculo de las afectaciones a la población.....	408
5.3.3. Herramienta para el cálculo de la vulnerabilidad por fenómenos naturales extremos .....	408
5.3.4. Herramientas finales para la automatización de cálculos .....	409

5.4. COMPARTIENDO LOS RESULTADOS.....	409
5.4.1. Cartografía básica.....	410
5.4.2. Aplicación web .....	414
<b>CAPÍTULO VI.....</b>	<b>417</b>
<b>DIAGNÓSTICO DE LOS RECURSOS MINERALES Y ENERGÉTICOS DE ARAGÓN EN UN CONTEXTO DE SOSTENIBILIDAD Y COMPETENCIA GLOBAL .....</b>	<b>418</b>
6.1. CRITERIOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS NIVELES DE INTERÉS DE LOS RECURSOS CONSIDERADOS .....	419
6.2. EL POTENCIAL MINERO DE ARAGÓN. RESULTADOS PARA LAS CATEGORÍAS DE RECURSOS CONSIDERADAS .....	424
6.2.1. Resultados por estado de actividad .....	424
6.2.2. Resultado por grupos de recursos .....	431
6.2.3. Evaluación global del interés minero de los recursos inventariados. Síntesis regional y provincial de los resultados .....	447
6.3. EL POTENCIAL MINERO DE ARAGÓN. RESULTADOS RELATIVOS A UNA SELECCIÓN DE RECURSOS.....	451
6.3.1. Alabastro (Rocas ornamentales) .....	452
6.3.2. Gravas (Rocas industriales) .....	455
6.3.3. Arcillas (Rocas industriales).....	458
6.3.4. Yeso (Minerales industriales) .....	461
6.3.5. Caolín (Minerales industriales) .....	464
6.3.6. Bauxita (Minerales metálicos).....	467

6.3.7. Manganeso (Minerales industriales).....	468
6.3.8. Hierro (Minerales metálicos) .....	472
6.3.9. Carbón (Recursos energéticos) .....	476
6.3.10. Uranio (Recursos energéticos).....	479
6.3.11. Hidrocarburos no convencionales .....	482
6.3.12. Antimonio (Elementos críticos: minerales metálicos) .....	487
6.3.13. Barita (Elementos críticos: minerales metálicos).....	489
6.3.14. Cobalto (Elementos críticos: minerales metálicos).....	492
6.3.15. Espato flúor (Elementos críticos: minerales industriales) .....	494
6.3.16. Fósforo (Elementos críticos: minerales metálicos) .....	497
6.3.17. Grafito (Elementos críticos: minerales industriales).....	499
6.3.18. Magnesio (Elementos críticos: minerales metálicos) .....	501
6.3.19. Sílice (Elementos críticos: minerales industriales).....	503
6.3.20. Resultados globales del análisis para los elementos críticos.....	505
6.4. RECAPITULACIÓN FINAL.....	506
<b>CAPÍTULO VII.....</b>	<b>508</b>
<b>RECAPITULACIÓN FINAL .....</b>	<b>509</b>
7.1. REVISIÓN DE LOS OBJETIVOS .....	510
7.1.1. Establecer una tipología y un diagnóstico actualizados de los recursos mineros, energéticos y las aguas de Aragón, prestando especial atención a los catalogados como críticos por la UE .....	510

7.1.2. Analizar y evaluar el potencial de aprovechamiento de estos recursos y el impacto territorial previsible que supondría la puesta en marcha de una actividad minera ligada a ellos .....	514
7.1.3. Generar el paquete de herramientas oportuno para la traslación de la metodología de análisis propuesta a otros territorios, minimizando los tiempos de trabajo, y crear una plataforma de visualización que permita difundir los resultados del estudio .....	518
7.2. LÍNEAS DE ACTUACIÓN FUTURA .....	521
7.3. CONSIDERACIONES FINALES .....	522
<b>CAPÍTULO VII (ITALIANO) .....</b>	<b>524</b>
<b>RICAPITOLAZIONE FINALE .....</b>	<b>525</b>
7.1. VALUTAZIONE DEGLI OBIETTIVI .....	526
7.1.1. Stabilire una tipologia e una diagnosi attualizzata delle risorse minerarie, energetiche e idriche di Aragón, rivolgendo particolare attenzione a quelle catalogate come critiche dalla UE. ....	526
7.1.2. Analizzare e valutare il potenziale sfruttamento di queste risorse e l'impatto territoriale prevedibile nell'ipotesi di avviamento d'una attività mineraria ad esse legata .....	529
7.1.3. Generare il pacchetto di strumenti adeguato per la traslazione della metodologia di analisi proposta ad altri territori, minimizzando i tempi di lavoro, e creare una piattaforma di visualizzazione che permetta diffondere i risultati del lavoro .....	533
7.2. LINEE DI APPICAZIONE FUTURE .....	536
7.3. CONSIDERAZIONI FINALI .....	537

<b>ANEXO I</b> .....	<b>539</b>
CARTOGRAFÍA SISTEMÁTICA DE LOS INDICADORES ESPACIALES DEL ANÁLISIS PARA UNA EVALUACIÓN DEL INTERÉS DE EXPLOTACIÓN DE LOS RECURSOS MINEROS DE ARAGÓN.	540
<b>ANEXO II</b> .....	<b>567</b>
CONSTRUCCIÓN Y EJEMPLOS DE APLICACIÓN DE LA PLATAFORMA DE VISUALIZACIÓN.	568
<b>ANEXO III</b> .....	<b>576</b>
CONVENIO DE COLABORACIÓN ENTRE EL GOBIERNO DE ARAGÓN, LA UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA Y LA AGRUPACIÓN DE EMPRESAS MINERAS DE ARAGÓN (AEMA) PARA EL DESARROLLO DE ACTIVIDADES INVESTIGADORES EN EL SECTOR ENERGÉTICO Y MINERO DE ARAGÓN .....	577
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>584</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPÍTULO II

Figura 2.1. Mapa político de Aragón. Elaboración propia.....	82
Figura 2.2. Número de empleos en el sector minero por provincia y a nivel regional. Elaboración propia a partir de los “Datos fundamentales del sector minero. Años 1994-2015” (IAEST, 2017). .....	85
Figura 2.3. Producción vendible, en miles de €, de productos mineros por provincia e inversiones en el sector minero aragonés. Elaboración propia a partir de los “Datos fundamentales del sector minero. Años 1994-2015” (IAEST, 2017). .....	86
Figura 2.4. Valor añadido bruto de las actividades ligadas a la industria extractiva, la energía y las aguas (2016). Porcentaje relativo de estas actividades respecto al total comarcal. Elaboración propia a partir de datos del Instituto Aragonés de Estadística....	87
Figura 2.5. Comportamiento de la demanda de metales en función del precio. Elaboración propia a partir de los datos de las publicaciones “Introducción a la economía y la hacienda pública: Tema 4. Elasticidad oferta y demanda” (Hernández Carrión y Pastor, 2009) y “Recursos Minerales. Tipología, prospección, evaluación, explotación, mineralurgia e impacto ambiental” (Bustillo y López Jimeno, 2000). .....	93
Figura 2.6. (Izquierda): Efecto sumidero en el medio rural. Modificado de Gómez Orea (2002), “Marco conceptual de la Ordenación Territorial” .....	107
Figura 2.7. (Derecha) Círculo del declive de las regiones rurales. Modificado de OECD (2006), “The New Rural Paradigm: Policies and Governance” .....	107
Figura 2.8. Espiral del progreso. Modificado de Velasco (2001), “Acciones de política territorial: públicos en espacios rurales” .....	109
Figura 2.9. Mecanismo del modelo de base económico. Modificado de “Human Geography in Action” (Kuby et al., 2000). .....	110
Figura 2.10. Los tres pilares de la sostenibilidad. Modificado de Oyarzun, Higuera y Lillo (2011), “Minería Ambiental. Una introducción a los impactos y su remediación” .....	132
Figura 2.11. Conflictos activos en 2018 relacionados con el control de los recursos, divididos por intensidad y región geográfica. Elaboración propia a partir de los datos del Conflict Barometer 2018, Heidelberg Institute for International Conflict Research (HIIC).....	140
Figura 2.12. Resultados de la evaluación de importancia económica y riesgo en el suministro de 2017. Elaboración propia a partir de datos de la Unión Europea. ....	149

Figura 2.13. Evolución de los precios del petróleo con la inflación ajustada a valores de febrero de 2019. Elaboración propia a partir de los datos de la web InflationData.com (2019). ..... 156

Figura 2.14. Diagrama metodológico que muestra el flujo de trabajo seguido en la tesis. Elaboración propia. .... 160

### CAPÍTULO III

Figura 3.1. Diagrama de McKelvey. Este modelo define las reservas en función del conocimiento geológico y la capacidad tecnología de explotación o rentabilidad económica. Modificado de (Bustillo y López Jimeno, 2000). ..... 166

Figura 3.2. Principales factores que determinan la movilidad entre recursos y reservas. Modificado de (Bustillo y López Jimeno, 2000). ..... 167

Figura 3.3. Información sobre el Catastro Minero descargable en la Infraestructura de Datos de Aragón. Elaboración propia. .... 174

Figura 3.4. Ejemplo de resultado de búsqueda de derechos mineros en la aplicación del Ministerio de Energía. Fuente: Catastro Minero (Gobierno de España). ..... 175

Figura 3.5. Ejemplo de tabla incluida en las memorias de la Serie MAGNA que analiza la presencia de yacimientos en la Hoja 415-MEQUINENZA. Fuente: Mapa Geológico de España 1:50.000 (IGME, 1997a). ..... 176

Figura 3.6. Detalle del mapa correspondiente a la Hoja 519-AGUAVIVA en el que las minas o canteras se representan con do martillos cruzados, invertidos en el caso de las explotaciones abandonadas. Fuente: Mapa Geológico de España 1:50.000 (IGME, 1979). ..... 178

Figura 3.7. Ejemplo de WMS de Metalogenia en una zona de la Cordillera Ibérica que cubre áreas de las comarcas zaragozanas del Campo de Cariñena y Campo de Daroca al norte, y la Comarca del Jiloca, en Teruel, al sur. Elaboración propia. .... 179

Figura 3.8. Área cubierta por las hojas del Mapa de Rocas y Minerales Industriales 1:200.000 consultadas. Elaboración propia. .... 180

Figura 3.9. Ejemplo de empleo de la herramienta que permite transformar la información registrada en una tabla con coordenada en un archivo de mapa. Elaboración propia. 186

Figura 3.10. Ejemplo de mapa topográfico con topónimos locales. Fuente: SIGPAC ARAGÓN (Gobierno de Aragón, 2019). ..... 187

Figura 3.11. Derecho Minero Marco Antonio Fr. 2ª para la explotación de yeso en Pina de Ebro (Zaragoza). El punto morado representa el registro referente a esa explotación dentro de la base de datos. Elaboración propia. .... 189

Figura 3.12. Morfología de una explotación de caolín en Berge (Teruel). Elaboración propia.....	192
Figura 3.13. Perímetro de la explotación de arcilla “Los Cirios” en Rubielos de Mora (Teruel) y circunferencia que lo inscribe. Elaboración propia.....	193
Figura 3.14. Gráfica que muestra la frecuencia relativa de explotaciones mineras en función del área del círculo en el que se circunscribe su perímetro. Elaboración propia.....	194
Figura 3.15. Densidad de elementos registrados en la base de datos en un radio de 5 km. Elaboración propia.....	195
Figura 3.16. Número de elementos inventariados por comarca. Elaboración propia.....	196
Figura 3.17. Porcentaje de registros del inventario por grupo de recursos. Elaboración propia.....	197
Figura 3.18. Número de elementos registrados por tipo y estado de actividad para el grupo de las aguas.....	199
Figura 3.19. Distribución de los recursos inventariados pertenecientes al grupo de las aguas. Elaboración propia.....	200
Figura 3.20. Número de elementos registrados por tipo y estado de actividad para el grupo de las rocas ornamentales. Elaboración propia.....	203
Figura 3.21. Distribución elementos registrados correspondientes al grupo de las rocas ornamentales. Elaboración propia.....	204
Figura 3.22. Número de elementos registrados por tipo y estado de actividad para las rocas industriales con un mayor número de elementos inventariados. Elaboración propia.....	205
Figura 3.23. Número de elementos registrados por tipo y estado de actividad para el resto de recursos englobados dentro de las rocas industriales. Elaboración propia.....	207
Figura 3.24. Distribución elementos registrados correspondientes al grupo de las rocas industriales. Elaboración propia.....	208
Figura 3.25. Número de elementos registrados por tipo y estado de actividad para el grupo de los minerales industriales. Elaboración propia.....	211
Figura 3.26. Distribución elementos registrados correspondientes al grupo de los minerales industriales. Elaboración propia.....	213
Figura 3.27. Número de elementos registrados por tipo y estado de actividad para el grupo de los minerales metálicos. Elaboración propia.....	214

Figura 3.28. Distribución de los recursos inventariados pertenecientes al grupo de los recursos energéticos. Elaboración propia. ....	217
Figura 3.29. Número de elementos registrados por tipo y estado de actividad para el grupo de los recursos energéticos. Elaboración propia. ....	218
Figura 3.30. Distribución de los recursos inventariados pertenecientes al grupo de los recursos energéticos. Elaboración propia. ....	220
Figura 3.31. Distribución espacial de los afloramientos muestreados. Elaboración propia. ....	222
Figura 3.32. Afloramiento de la Fm. Pizarras de Checa en el término municipal de Checa, próximo a la carretera que une esta localidad con Orea, ambas en la provincia de Guadalajara. Fuente: Iván Polo (Checa, Guadalajara; 2015). ....	223
Figura 3.33. Localización del afloramiento de la Formación Pizarras de Checa en el término municipal de Checa (Guadalajara). Elaboración propia. ....	224
Figura 3.34. Afloramiento de la Fm. Pizarras de Checa en la carretera que une Torres de Albarracín con la localidad con Albarracín. Fuente: Iván Polo (Torres de Albarracín, Teruel; 2015). ....	224
Figura 3.35. Localización del afloramiento de la Formación Pizarras de Checa en el término municipal de Torres de Albarracín (Teruel). Elaboración propia. ....	225
Figura 3.36. Localización del afloramiento de la Formación La Hoz en el término municipal de Montalbán (Teruel). Elaboración propia. ....	226
Figura 3.37. Localización de los afloramientos correspondientes a las formaciones Cerro del Pez (O) y Turmiel (OT) en el término municipal de Obón (Teruel). Elaboración propia. ....	227
Figura 3.38. Localización del afloramiento correspondiente a la Formación Turmiel en el término municipal de Aguatón (Teruel). Elaboración propia. ....	228
Figura 3.39. Afloramiento de la Fm. Turmiel. Fuente: Iván Polo (Aguatón, Teruel 2015). ....	228
Figura 3.40. Fm. Margas de Frías. Fuente: Iván Polo (Moscardón, Teruel 2015). ....	228
Figura 3.41. Localización de los afloramientos correspondientes a la Formación Margas de Frías en las localidades de Frías de Albarracín y Moscardón (Teruel). Elaboración propia. ....	229
Figura 3.42. Afloramiento de la Fm. Sot de Chera en la carretera que une Gea de Albarracín con Cella. Fuente: Iván Polo (Gea de Albarracín, Teruel 2015). ....	230
Figura 3.43. Localización del afloramiento correspondiente a la Formación Sot de Chera en el término municipal de Gea de Albarracín (Teruel). Elaboración propia. ....	230

Figura 3.44. Localización del afloramiento correspondiente a la Fm. Escucha en el término municipal de Utrillas (Teruel). Elaboración propia. ....	231
Figura 3.45. Localización de los afloramientos correspondientes a las formaciones Artoles-Forcall (A) y Escucha (U) en el término municipal de Aliaga (Teruel). Elaboración propia. ....	232
Figura 3.46. Número de registros inventariados referentes a elementos críticos. Elaboración propia. ....	235
Figura 3.47. Número de elementos inventariados referentes al antimonio por provincia, agrupados por estado de actividad. Elaboración propia. ....	235
Figura 3.48. Número de elementos inventariados referentes a la barita por provincia, agrupados por estado de actividad. Elaboración propia. ....	236
Figura 3.49. Número de elementos inventariados referentes al cobalto por provincia, agrupados por estado de actividad. Elaboración propia. ....	236
Figura 3.50. Número de elementos inventariados referentes al espato flúor por provincia, agrupados por estado de actividad. Elaboración propia. ....	237
Figura 3.51. Número de elementos inventariados referentes al fósforo por provincia, agrupados por estado de actividad. Elaboración propia. ....	237
Figura 3.52. Número de elementos inventariados referentes al grafito por provincia, agrupados por estado de actividad. Elaboración propia. ....	238
Figura 3.53. Número de elementos inventariados referentes al magnesio por provincia, agrupados por estado de actividad. Elaboración propia. ....	238
Figura 3.54. Número de elementos inventariados referentes a la sílice por provincia, agrupados por estado de actividad. Elaboración propia. ....	239
Figura 3.55. Distribución espacial de los elementos críticos de la región aragonesa. Elaboración propia. ....	240
Figura 3.56. Principales unidades del relieve aragonés. Elaboración: Propia. ....	245
Figura 3.57. Mapa de pendientes de Aragón. Elaboración: propia. ....	248
Figura 3.58. (Izquierda): Mapa litológico de Aragón. Elaboración propia a partir de la información contenida en el Sistema de Información sobre Recursos y Medio Ambiente (Instituto Aragonés del Medio Ambiente, 1993) .....	250
Figura 3.59. (Derecha): Cobertura edáfica de Aragón. Elaboración propia a partir de la información de la página web del Grupo de investigación iARasol (2007). ....	250

Figura 3.60. Mapa de permeabilidad del territorio aragonés. Elaboración propia a partir de la información contenida en el Sistema de Información del Medio Ambiente de Aragón (Instituto Aragonés del Medio Ambiente, 1993).....	254
Figura 3.61. (Izquierda): Temperatura media anual. Elaboración propia a partir de datos del Atlas Climático de Aragón.....	257
Figura 3.62. (Derecha): Precipitación media anual. Elaboración propia a partir de información del Atlas Climático de Aragón. ....	257
Figura 3.63. (Izquierda): Potencial de generación de DAM en Aragón en función de la temperatura y precipitación media anual. Elaboración propia.....	261
Figura 3.64. (Derecha): Capacidad de atenuación del medio frente al drenaje ácido de minas basado en características litológicas, edáficas y de permeabilidad. Elaboración propia. ....	261
Figura 3.65. Red hidrográfica, canales y embalses artificiales y depósitos de agua. Elaboración propia. ....	264
Figura 3.66. Masas de agua subterráneas en la Comunidad Autónoma de Aragón. Elaboración propia a partir de datos procedentes de las Confederaciones Hidrográficas del Ebro, Júcar y Tajo. ....	266
Figura 3.67. (Izquierda): Mapa de peligrosidad sísmica de Aragón. Elaboración propia a partir del mapa de Peligrosidad Sísmica de España (Centro Nacional de Información Geográfica, 2015).....	269
Figura 3.68. (Derecha): Mapa de Susceptibilidad de Colapso en Aragón. Elaboración propia a partir de información suministrada por el Gobierno de Aragón. ....	269
Figura 3.69. Mapa de Susceptibilidad de Movimientos de Ladera. Elaboración propia a partir de información del Mapa de Susceptibilidad de Movimientos de Ladera (Servicios y Proyectos del Ebro S.A., 2011). ....	273
Figura 3.70. Mapa de riesgo por inundación. Elaboración propia a partir de la información contenida en el mapa ofrecido por el Gobierno de Aragón.....	276
Figura 3.71. (Izquierda): Precipitación máxima registrada en 24 horas. Elaboración propia a partir de los datos contenidos en el Atlas Climático de Aragón (Martín et al., 2007). ..	278
Figura 3.72. (Derecha): Riesgo por lluvias torrenciales en Aragón. Elaboración propia a partir de los datos contenidos en el Atlas Climático de Aragón (Martín et al., 2007). ..	278
Figura 3.73. Susceptibilidad de Vientos Fuertes. Elaboración propia a partir del mapa de Susceptibilidad de Vientos Fuertes (Servicios y Proyectos del Ebro S.A., 2011). ....	280

- Figura 3.74. Mapa de síntesis de los riesgos geológicos y climáticos: número de riesgos clasificados como de riesgo alto o muy alto en cada porción del territorio. Elaboración propia. .... 283
- Figura 3.75. Mapa de densidad de población de los municipios aragoneses y distribución de los núcleos poblacionales menores de 3.000 habitantes (año 2018). Elaboración propia a partir de datos del Instituto Aragonés de Estadística (IAEST). .... 286
- Figura 3.76. Mapa densidad poblamiento del territorio aragonés (año 2018). El radio establecido entorno a los núcleos de población fue fijado en 5 km, valor empleado en el indicador Afectaciones a la población. En la realización se establecieron categorías con un peso diverso en función de la población total residente en la localidad. Elaboración propia. .... 288
- Figura 3.77. Afiliaciones en alta a la Seguridad Social a nivel comarcal y porcentaje de afiliaciones en la cabecera comarcal y en el resto de municipios (año 2018). Número de afiliaciones a la Seguridad Social en función del número de habitantes. Los datos para la capital de la comarca del Maestrazgo, Cantavieja, no se encontraban disponibles en la fuente. Elaboración propia a partir de datos del Instituto Aragonés de Estadística. .... 289
- Figura 3.78. Índice de envejecimiento por municipio, resultado de la división, en tantos por ciento, de la población mayor de 65 años entre la menor de 16 (año 2018). En numerosos municipios, representados en gris en el mapa y localizados principalmente en el área rural de la Cordillera Ibérica, este índice no puede ser calculado debido a que no existe ningún habitante menor de 16 años. Elaboración propia a partir de datos del Instituto Aragonés de Estadística. .... 290
- Figura 3.79. Mapa de densidad parcelaria de la Comunidad Autónoma Aragonesa (número de parcelas por km<sup>2</sup>). Elaboración propia. .... 292
- Figura 3.80. Red de transportes de Aragón. Elaboración propia. Fuente: Base Cartográfica Nacional. .... 296
- Figura 3.81. (Izquierda): Centrales y subestaciones eléctricas y líneas de alta y baja tensión. Elaboración propia a partir de datos de la Base Cartográfica Nacional (Instituto Geográfico Nacional, 2011). .... 298
- Figura 3.82. (Derecha): Conducciones y depósitos de combustible y estaciones de servicio en la Comunidad Autónoma de Aragón. Elaboración propia a partir de datos de la Base Cartográfica Nacional (Instituto Geográfico Nacional, 2011). .... 298
- Figura 3.83. (Derecha): Distribución de los usos del suelo y de las masas boscosas en el territorio. Elaboración propia a partir de los datos del Mapa Forestal de España. .... 302
- Figura 3.84. (Izquierda): Masas boscosas de la región aragonesa diferencias en función de su origen natural o antrópico y de la densidad de la cubierta arbórea, según los criterios establecidos para este indicador. Elaboración propia a partir de los datos del Mapa Forestal de España. .... 302

Figura 3.85. Mapa que refleja la distribución de las 34 especies vegetales menos frecuentes dentro de la región aragonesa, así como la de las especies protegidas en la comunidad. Elaboración propia a partir de los datos del Mapa Forestal de España (Ministerio para la Transición Ecológica, 2006) y del Catálogo de Especies Amenazadas del Gobierno de Aragón (Gobierno de Aragón, 2007).....	304
Figura 3.86. Distribución de las figuras de protección que engloba la Red Natura 2000. Elaboración propia. ....	307
Figura 3.87. (Izquierda): Espacios Naturales Protegidos de Aragón. Elaboración propia..	310
Figura 3.88. (Derecha): Distribución de los LIGs, Humedales, Reservas de la biosfera y Montes de Aragón. Elaboración propia. ....	310
Figura 3.89. (Izquierda) Áreas críticas, Zonas de Protección para la Avifauna y Ámbitos de protección de Especies. Elaboración propia. ....	314
Figura 3.90. (Derecha) Distribución de los Puntos Singulares, Bienes de Interés Cultural y Árboles Singulares en el territorio. Elaboración propia.....	314
Figura 3.91. Mapa de calidad del paisaje de Aragón. Fuente: Gobierno de Aragón. ....	317

#### CAPÍTULO IV

Figura 4.1. División del gráfico biaxial en las categorías empleadas en este proyecto. Elaboración propia a partir de los datos empleados por la Unión Europea en el Study on the review of the list of Critical Raw Materials (2017).....	336
Figura 4.2. Representación mediante curvas de nivel de las dos superficies consideradas en el ejemplo. Elaboración propia. ....	341
Figura 4.3. Mapa que representa la pendiente (en grados) de las dos áreas consideradas. Elaboración propia. ....	341
Figura 4.4. Representación tridimensional de las áreas tomadas como ejemplo. Para la creación de la figura la componente vertical ha sido exagerada 100 veces con respecto a la componente horizontal. Elaboración propia. ....	343
Figura 4.5. Histograma en el que se muestra la distribución de los resultados del índice de adecuación topográfica, incluyendo en cada intervalo unitario del indicador el número de elementos registrados. Elaboración propia.....	344
Figura 4.6. Derecho Minero autorizado en la localidad de Tarazona (Zaragoza). Elaboración propia.....	359
Figura 4.7: Ejemplo de área de influencia delimitada por un tiempo de 25 minutos. Elaboración propia.....	366

Figura 4.8: Relación entre el valor del multiplicador de la base económica y el tamaño municipal. Elaboración propia. ....	367
Figura 4.9. Porcentaje potencial de empleo directo e indirecto por la apertura de una actividad minera de 10 empleados (en localidades menores de 10.000 habitantes). Elaboración propia. ....	368
Figura 4.10. Gráfico resultante de la repetición del análisis aumentando el número de empleos directos creados a 100. Elaboración propia.....	369
Figura 4.11. Representación de las áreas visibles (marcadas con una línea granate en la figura principal y en color rojo en la auxiliar) desde una cantera de gravas (en azul) en las proximidades de Labuerda (Huesca). Elaboración propia.....	372
Figura 4.12. Proceso esquematizado de obtención del índice de Afectación Paisajística utilizando como ejemplo un indicio de hierro en las proximidades de Benasque (Huesca). Elaboración propia.....	379
Figura 4.13. Ubicaciones más valoradas dentro de cada municipio a partir del índice calculado. Detalle de la cuadrícula para la comarca de la Sierra de Albarracín. Elaboración propia. ....	381
Figura 4.14. Cubo desagregado que muestra las posibles combinaciones de los resultados obtenidos en cada una de las tres dimensiones consideradas en el análisis. Elaboración propia. ....	384
Figura 4.15. Cubo que representa la situación mencionada en el ejemplo. La fracción del cubo que representa la situación descrita, es decir, un interés alto en la dimensión Perfil geológico y medio en la Aptitud del terreno e Inserción socioeconómica, se representa en un color verde más oscuro. Elaboración propia. ....	386
<b>CAPÍTULO V</b>	
Figura 5.1. Proceso de georreferenciación de parte de la imagen del Atlas Climático de Aragón correspondiente al mapa de temperatura media anual. Elaboración propia. ..	394
Figura 5.2. Análisis topológico de la capa referente a la litología de la región. Los errores topológicos aparecen marcados en color rojo. Elaboración propia.....	395
Figura 5.3. Modelo digital de elevación empleado en indicadores como las afectaciones a la población y al paisaje. Elaboración propia.....	397
Figura 5.4. Ejemplo de la capa de parcelación procedente del SIGPAC en el término municipal de Monreal del Campo (Teruel). Elaboración propia. ....	398
Figura 5.5. Relación de unidades poblacionales englobadas dentro del municipio de Aliaga (Teruel). Fuente: Fichas territoriales de Estadística Local de Aragón (IAEST). ....	400

Figura 5.6. Introducción de un nodo de conexión en la intersección de dos vías de comunicación mediante la herramienta Planarizar línea. Elaboración propia. ....	402
Figura 5.7. Digitalización de forma manual de caminos no existentes en la BCN. Elaboración propia. ....	402
Figura 5.8. Ejemplo de modelo creado con ModelBuilder. Elaboración propia. ....	403
Figura 5.9. Ejemplo de herramienta generada mediante ModelBuilder para el cálculo del indicador Acceso a las infraestructuras. Elaboración propia.....	405
Figura 5.10. Aspecto de la caja de herramientas contenedora de los modelos generados. Elaboración propia. ....	405
Figura 5.11. Aspecto del primer submodelo del geoprocesamiento. Elaboración propia.	406
Figura 5.12. Distribución de los puntos de control agregados para el análisis geoestadístico. Elaboración propia.....	412
Figura 5.13. Resultado del análisis geoestadístico que determina la población expuesta desde cada punto del territorio. Elaboración propia. ....	413
Figura 5.14. Detalle de la ventana emergente de uno de los municipios de la comunidad en el que se muestra la imagen asociada en la ventana emergente. Elaboración propia..	415
<b>CAPÍTULO VI</b>	
Figura 6.1. Distribución de los resultados obtenidos en la dimensión que valora el perfil geológico. Elaboración propia. ....	420
Figura 6.2. Distribución de los resultados obtenidos en la dimensión que valora la aptitud del terreno en función de los grupos de recursos analizados. Elaboración propia. ....	421
Figura 6.3. Distribución de los resultados obtenidos en la dimensión Inserción socioeconómica por las aguas y por el resto de recursos minerales analizados. Elaboración propia. ....	422
Figura 6.4. Ubicaciones consideradas como descartables para el establecimiento de una labor extractiva por sus características medioambientales o por el uso del suelo actual. Elaboración propia. ....	423
Figura 6.5. Número de registros en la base de datos por estado de actividad y por grupo de recursos. Elaboración propia. ....	425
Figura 6.6. Porcentaje de elementos perteneciente a cada estado de actividad en cada grupo de recursos. Elaboración propia.....	426
Figura 6.7. Porcentaje de elementos incorporado a cada categoría de interés en cada estado de actividad. Elaboración propia. ....	427

Figura 6.8. Porcentaje de explotaciones activas incorporadas a cada categoría de interés para los diferentes grupos de recursos. Elaboración propia.....	428
Figura 6.9. Porcentaje de derechos mineros clasificados en cada categoría de interés para los diferentes grupos de recursos. Elaboración propia. ....	429
Figura 6.10. Porcentaje de yacimientos potencialmente recuperables clasificados en cada categoría de interés para los diferentes grupos de recursos. Elaboración propia.....	430
Figura 6.11. Porcentaje de indicios clasificados en cada categoría de interés para los diferentes grupos de recursos. Elaboración propia.....	430
Figura 6.12. Resultados del análisis por grupo de recursos. Elaboración propia.....	431
Figura 6.13. Resultados del análisis del potencial minero en cada una de las dimensiones consideradas para los registros relativos a las aguas. Elaboración propia.....	432
Figura 6.14. Proporción de registros incorporados en cada una de las posibles combinaciones derivadas del cruce de las tres dimensiones consideradas en el análisis para el grupo de las aguas. Elaboración propia.....	433
Figura 6.15. Porcentaje de elementos clasificados por interés y provincia para el grupo de las aguas. El tamaño de los círculos es proporcional al número de elementos inventariados. Elaboración propia. ....	434
Figura 6.16. Resultados del análisis del potencial minero en cada una de las dimensiones consideradas para los registros relativos a las rocas ornamentales. Elaboración propia.....	435
Figura 6.17. Proporción de registros incorporados en cada una de las posibles combinaciones derivadas del cruce de las tres dimensiones consideradas en el análisis para el grupo de las rocas ornamentales. Elaboración propia. ....	435
Figura 6.18. Porcentaje de elementos clasificados por interés y provincia para el grupo de las rocas ornamentales. El tamaño de los círculos es proporcional al número de elementos inventariados. Elaboración propia.....	436
Figura 6.19. Resultados del análisis del potencial minero en cada una de las dimensiones consideradas para los registros relativos a las rocas industriales. Elaboración propia..	437
Figura 6.20. Proporción de registros incorporados en cada una de las posibles combinaciones derivadas del cruce de las tres dimensiones consideradas en el análisis para el grupo de las rocas industriales. Elaboración propia.....	438
Figura 6.21. Porcentaje de elementos clasificados por interés y provincia para el grupo de las rocas industriales. El tamaño de los círculos es proporcional al número de elementos inventariados. Elaboración propia.....	439

- Figura 6.22. Resultados del análisis del potencial minero en cada una de las dimensiones consideradas para los registros relativos a los minerales industriales. Elaboración propia. .... 439
- Figura 6.23. Proporción de registros incorporados en cada una de las posibles combinaciones derivadas del cruce de las tres dimensiones consideradas en el análisis para el grupo de los minerales industriales. Elaboración propia. .... 441
- Figura 6.24. Porcentaje de elementos clasificados por interés y provincia para el grupo de los minerales industriales. El tamaño de los círculos es proporcional al número de elementos inventariados. Elaboración propia. .... 442
- Figura 6.25. Resultados del análisis del potencial minero en cada una de las dimensiones consideradas para los registros relativos a los minerales metálicos. Elaboración propia. .... 442
- Figura 6.26. Proporción de registros incorporados en cada una de las posibles combinaciones derivadas del cruce de las tres dimensiones consideradas en el análisis para el grupo de los minerales metálicos. Elaboración propia. .... 444
- Figura 6.27. Porcentaje de elementos clasificados por interés y provincia para el grupo de los minerales metálicos. El tamaño de los círculos es proporcional al número de elementos inventariados. Elaboración propia. .... 445
- Figura 6.28. Resultados del análisis del potencial minero en cada una de las dimensiones consideradas para los registros relativos a los recursos energéticos. Elaboración propia. .... 446
- Figura 6.29. Proporción de registros incorporados en cada una de las posibles combinaciones derivadas del cruce de las tres dimensiones consideradas en el análisis para el grupo de los recursos energéticos. Elaboración propia. .... 446
- Figura 6.30. Porcentaje de elementos clasificados por interés y provincia para el grupo de los recursos energéticos. El tamaño de los círculos es proporcional al número de elementos inventariados. Elaboración propia. .... 447
- Figura 6.31. Porcentaje de registros de la base de datos asignados a cada categoría de interés. Elaboración propia. .... 448
- Figura 6.32. Porcentaje de registros clasificados con un interés alto por provincias. Elaboración propia. .... 449
- Figura 6.33. Porcentaje de registros clasificados con un interés bajo por provincias. Elaboración propia. .... 450
- Figura 6.34. Porcentaje de elementos clasificados por interés y provincia. El tamaño de los círculos es proporcional al número de elementos inventariados. Elaboración propia. . 451

Figura 6.35. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes al alabastro. Elaboración propia.....	452
Figura 6.36. Resultados del análisis del potencial minero en cada una de las dimensiones consideradas para los registros relativos al alabastro. Elaboración propia. ....	453
Figura 6.37. Distribución espacial de los resultados obtenidos por los registros de alabastro en la base de datos. Elaboración propia.....	453
Figura 6.38. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes al alabastro, agrupados por estado de actividad. Elaboración propia.....	454
Figura 6.39. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes a las gravas. Elaboración propia.....	455
Figura 6.40. Resultados del análisis del potencial minero en cada una de las dimensiones consideradas para los registros relativos a las gravas. Elaboración propia.....	456
Figura 6.41. Distribución espacial de los resultados obtenidos por los registros de gravas en la base de datos. Elaboración propia.....	457
Figura 6.42. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes a las gravas, agrupados por estado de actividad. Elaboración propia.....	458
Figura 6.43. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes a las arcillas. Elaboración propia.....	458
Figura 6.44. Resultados del análisis del potencial minero en cada una de las dimensiones consideradas para los registros relativos a las arcillas. Elaboración propia.....	459
Figura 6.45. Distribución espacial de los resultados obtenidos por los registros de arcillas en la base de datos. Elaboración propia.....	460
Figura 6.46. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes a las arcillas, agrupados por estado de actividad. Elaboración propia.....	461
Figura 6.47. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes al yeso. Elaboración propia. ....	462
Figura 6.48. Distribución espacial de los resultados obtenidos por los registros correspondientes a los yesos. Elaboración propia. ....	463
Figura 6.49. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes al yeso, agrupados por estado de actividad. Elaboración propia.....	464
Figura 6.50. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes al caolín. Elaboración propia. ....	465

Figura 6.51. Resultados del análisis del potencial minero en cada una de las dimensiones consideradas para los registros relativos al caolín. Elaboración propia.....	465
Figura 6.52. Distribución espacial de los resultados obtenidos por los registros correspondientes al caolín. Elaboración propia. ....	466
Figura 6.53. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes al caolín agrupados por estado de actividad. Elaboración propia.....	467
Figura 6.54. Resultados del análisis del potencial minero en cada una de las dimensiones consideradas para los registros relativos a la bauxita. Elaboración propia.....	467
Figura 6.55. Distribución espacial de los resultados obtenidos por los registros correspondientes a la bauxita Elaboración propia. ....	468
Figura 6.56. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes al manganeso. Elaboración propia. ....	469
Figura 6.57. Resultados del análisis del potencial minero en cada una de las dimensiones consideradas para los registros relativos al manganeso. Elaboración propia.....	470
Figura 6.58. Distribución espacial de los resultados obtenidos por los registros correspondientes al manganeso. Elaboración propia. ....	471
Figura 6.59. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes al manganeso agrupados por estado de actividad. Elaboración propia. ....	472
Figura 6.60. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes al hierro. Elaboración propia. ....	473
Figura 6.61. Resultados del análisis del potencial minero en cada una de las dimensiones consideradas para los registros relativos al hierro. Elaboración propia. ....	474
Figura 6.62. Distribución espacial de los resultados obtenidos por los registros correspondientes al hierro. Elaboración propia. ....	475
Figura 6.63. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes al hierro agrupados por estado de actividad. Elaboración propia.....	476
Figura 6.64. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes al carbón. Elaboración propia.....	476
Figura 6.65. Resultados del análisis del potencial minero en cada una de las dimensiones consideradas para los registros relativos al carbón. Elaboración propia. ....	477
Figura 6.66. Distribución y valoración de los elementos registrados en la base de datos referentes al carbón. Porcentaje de elementos clasificados por interés en cada cuenca carbonífera, donde el tamaño de los gráficos es proporcional al número de elementos inventariados. Elaboración propia.....	478

Figura 6.67. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes al carbón agrupados por estado de actividad. Elaboración propia.....	479
Figura 6.68. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes al uranio. Elaboración propia.....	480
Figura 6.69. Distribución espacial de los resultados obtenidos por los registros correspondientes al uranio. Elaboración propia. ....	481
Figura 6.70. Resultados del análisis del potencial minero en cada una de las dimensiones consideradas para los registros relativos al uranio. Elaboración propia.....	482
Figura 6.71. Resultados del análisis TOC simbolizados en función de la clasificación de McCarthy (2011). Los puntos agrupados dentro de una caja proceden del mismo afloramiento, pero pertenecen a distintos niveles de la formación rocosa. En estos casos, la ubicación espacial concreta del yacimiento coincide con la del punto inferior, que se corresponde, a su vez, con el nivel situado más cerca de la base en la formación geológica. Elaboración propia.....	484
Figura 6.72. Resultados del análisis para el grupo configurado por los hidrocarburos no convencionales.....	484
Figura 6.73. Resultados finales del análisis de los indicios correspondientes a rocas madre generadoras de hidrocarburos. Elaboración propia.....	485
Figura 6.74. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes al antimonio. Elaboración propia. ....	487
Figura 6.75. Resultados del análisis del potencial minero en cada una de las dimensiones consideradas para los registros relativos al antimonio. Elaboración propia.....	488
Figura 6.76. Distribución espacial de los registros de antimonio en la base de datos. Elaboración propia. ....	489
Figura 6.77. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes a la barita. Elaboración propia. ....	490
Figura 6.78. Resultados del análisis del potencial minero en cada una de las dimensiones consideradas para los registros relativos a la barita. Elaboración propia. ....	490
Figura 6.79. Distribución espacial de los registros de barita en la base de datos. Elaboración propia. ....	491
Figura 6.80. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes a la barita agrupados por estado de actividad. Elaboración propia. ....	492
Figura 6.81. Distribución espacial de los registros de cobalto en la base de datos. Elaboración propia. ....	493

Figura 6.82. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes al cobalto. Elaboración propia.....	494
Figura 6.83. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes al espato flúor. Elaboración propia. ....	495
Figura 6.84. Resultados del análisis del potencial minero en cada una de las dimensiones consideradas para los registros relativos al espato flúor. Elaboración propia.....	495
Figura 6.85. Distribución espacial de los registros de espato flúor en la base de datos. El tamaño de los puntos en ambas ampliaciones del mapa está relacionado con las reservas estimadas del yacimiento representado. Elaboración propia. ....	496
Figura 6.86. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes al espato flúor agrupados por estado de actividad. Elaboración propia. ....	497
Figura 6.87. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes al fósforo. Elaboración propia. ....	497
Figura 6.88. Resultados del análisis del potencial minero en cada una de las dimensiones consideradas para los registros relativos al fósforo. Elaboración propia.....	498
Figura 6.89. Distribución espacial de los registros de fósforo en la base de datos. Elaboración propia. ....	499
Figura 6.90. Distribución espacial de los registros de grafito en la base de datos. Elaboración propia. ....	500
Figura 6.91. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes al grafito. Elaboración propia. ....	501
Figura 6.92. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes al magnesio. Elaboración propia. ....	501
Figura 6.93. Resultados del análisis del potencial minero en cada una de las dimensiones consideradas para los registros relativos al magnesio. Elaboración propia.....	502
Figura 6.94. Distribución espacial de los registros de magnesio en la base de datos. Elaboración propia. ....	503
Figura 6.95. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes a la sílice. Elaboración propia. ....	504
Figura 6.96. Distribución espacial de los registros de sílice en la base de datos. Elaboración propia. ....	505
Figura 6.97. Porcentaje de registros referentes a elementos críticos clasificados en cada categoría de interés. Elaboración propia.....	506

**CAPÍTULO VII**

- Figura 7.1. Número de registros correspondientes a explotaciones, derechos mineros, yacimientos e indicios minerales de los elementos más numerosos en cada categoría de recursos. Elaboración propia ..... 511
- Figura 7.2. Número de registros incorporados en la base de datos por categoría de recursos. Elaboración propia. .... 512
- Figura 7.3. Mapa de las canteras del Piamonte (Carta delle cave della Regione Piemonte). Elaboración propia. .... 520

**CAPÍTULO VII (ITALIANO)**

- Figura IT.7.1. Numero di registri corrispondenti a sfruttamento, diritti minerari, giacimenti e indizi di risorse minerarie degli elementi più frequenti in ciascuna categoria di risorse. Elaborazione propria..... 527
- Figura IT.7.2. Numero di registri incorporate nella base di dati per categoria di risorse. Elaborazione propria..... 528
- Figura IT.7.3. Carta delle cave della Regione Piemonte. Elaborazione propria. .... 535

**ANEXO II**

- Figura Anexo II.1. Habilidadación y configuración de ventanas emergentes para la capa Reservas de la Biosfera. Elaboración propia..... 569
- Figura Anexo II.2. Pestaña “Mapa” de Web AppBuilder. En ella se deberá seleccionar el Web Map que mostrará la aplicación, así como la extensión espacial visible al iniciar la aplicación. Elaboración propia..... 569
- Figura Anexo II.3. Widgets Leyenda y Lista de capas. Elaboración propia..... 570
- Figura Anexo II.4. Galería de marcadores correspondientes a zonas mineras o con abundancia de recursos y a las capitales de provincia, con una imagen asignada a cada marcador. Elaboración propia. .... 571
- Figura Anexo II.5. Área directamente expuesta a una hipotética explotación minera, simbolizada por un punto rosa, en el entorno de la ciudad de Zaragoza. Elaboración propia..... 572
- Figura Anexo II.6. Comparación entre la distribución de los diferentes registros en el territorio representados en función del elemento que representan y la caracterización según el interés y el estado de los mismos con la herramienta swipe. Elaboración propia..... 572

Figura Anexo II.7. Ejemplo de esquemas de agrupación de puntos y medidas realizados de forma manual con la herramienta dibujar.....	573
Figura Anexo II.8. Ejemplo de cálculo de ruta entre una población y un yacimiento.....	574
Figura Anexo II.9. El widget Near me crea una lista con todos los puntos inventariados en torno a una localización especificada por el usuario. Elaboración propia. ....	574
Figura Anexo II.10. El widget ordena los yacimientos/indicios de un determinado elemento en función de la cercanía a una ubicación propuesta por el usuario. Elaboración propia. ....	575
Figura Anexo II.11. Núcleos de población ordenados por su proximidad a un punto inventariado. Elaboración propia. ....	575

## ÍNDICE DE TABLAS

### CAPÍTULO II

Tabla 2.1. Lista de materias primas consideradas críticas por la Unión Europea (2017). Elaboración propia. ....	150
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

### CAPÍTULO III

Tabla 3.1. Información sobre las exportaciones e indicios de calizas del Malm en la Hoja de Teruel del Mapa de Rocas y Minerales Industriales 1:200.000 (IGME, s. f.-b).....	182
Tabla 3.2. Resultados del análisis calcimétrico efectuado a las muestras tomadas en el campo. En azul se resaltan las muestras seleccionadas para el análisis TOC. Elaboración propia. ....	233
Tabla 3.3. Especies vegetales cuya extensión supone menos de un 0,02% del total de la superficie vegetal de Aragón. Elaboración propia.....	303

### CAPÍTULO IV

Tabla 4.1. Indicadores de la dimensión Perfil Geológico. Elaboración propia. ....	326
Tabla 4.2. Categorías del indicador que analiza el estado de actividad. Elaboración propia. ....	329
Tabla 4.3. Categorías del indicador tamaño. Elaboración propia. ....	331
Tabla 4.4. Categorías del indicador referente a la forma de aparición del mineral en el yacimiento. Elaboración propia. ....	332
Tabla 4.5. Categorías del indicador que analiza los recursos minerales asociados. Elaboración propia. ....	333
Tabla 4.6. Categorías del indicador referente al valor estratégico. Elaboración propia....	337
Tabla 4.7. Elementos y minerales detectados en la Comunidad Autónoma aragonesa que superan los umbrales establecidos por la UE en alguno de los dos criterios empleados en el estudio de los materiales críticos, agrupados en función de la categoría a la que fueron asignados en este indicador. Elaboración propia. ....	337
Tabla 4.8. Criterios de evaluación de las rocas generadoras. Basado en la clasificación propuesta por McCarthy (2011), (Bennet et al., 2005). ....	338
Tabla 4.9. Categorías del indicador referente al análisis del TOC. Elaboración propia. ....	338

Tabla 4.10. Indicadores empleados en la dimensión Aptitud del Terreno. Elaboración propia.....	339
Tabla 4.11. Categorías del indicador que analiza la adecuación topográfica. Elaboración propia.....	345
Tabla 4.12. Categorías que componen el indicador que estudia la capacidad de recarga de los acuíferos. Elaboración propia.....	347
Tabla 4.13. Criterios de valoración del indicador que estudia el Drenaje Ácido de Minas para los minerales metálicos y los recursos energéticos. Elaboración propia. ....	350
Tabla 4.14. Criterios de valoración del indicador que estudia el Drenaje Ácido de Minas y otros tipos de contaminación para los grupos de recursos compuestos por los minerales y rocas industriales, las rocas ornamentales y las aguas. Elaboración propia. ....	350
Tabla 4.15. Categorías que componen el indicador sobre la generación y difusión del DAM y otros tipos de contaminación. Elaboración propia.....	351
Tabla 4.16. Peso asignado a cada tipo de riesgo en función de su potencial para provocar daños y su frecuencia en el territorio. Elaboración propia. ....	353
Tabla 4.17. Categorías que componen el indicador que estudia la vulnerabilidad del territorio frente a eventos naturales extremos. Elaboración propia. ....	353
Tabla 4.18. Indicadores empleados en el análisis de la dimensión inserción socioeconómica, su valoración y las categorías que componen cada uno de ellos. Elaboración propia.....	356
Tabla 4.19. Valor adicionado a la densidad parcelaria por la extensión del área proyectada para la actividad minera por varias entidades administrativas. Elaboración propia. ....	358
Tabla 4.20. Categorías en las que se divide el indicador referente al régimen de propiedad del terreno. Elaboración propia.....	359
Tabla 4.21. Elementos que valoran la accesibilidad al yacimiento, radio de influencia y peso relativo. Elaboración propia.....	361
Tabla 4.22. Elementos que valoran el acceso al agua, área de influencia y peso relativo. Elaboración propia.....	362
Tabla 4.23. Aspectos que analizan el acceso a la electricidad, su área de influencia y su peso relativo. Elaboración propia.....	363
Tabla 4.24. Elementos que analizan el acceso al combustible, área de influencia y valoración. Elaboración propia.....	364
Tabla 4.25. Categorías en las que se descompone el indicador referente al acceso a las infraestructuras y su peso asociado. Elaboración propia.....	365

Tabla 4.26. Categorías que componen el indicador que analiza el impacto potencial en la economía local, umbrales establecidos y peso asignado. Elaboración propia.....	369
Tabla 4.27. Categorías que componen el indicador que analiza el impacto potencial en la economía local para el caso de las aguas, umbrales establecidos y peso asignado. Elaboración propia. ....	370
Tabla 4.28. Categorías que componen el indicador que analiza el nivel de exposición de los núcleos de población, intervalo de habitantes directamente expuestos incluidos en cada categoría y peso asociado. Elaboración propia.....	372
Tabla 4.29. Categorías establecidas para el indicador Afectaciones de los bosques y de la cubierta vegetal. Características, ejemplos y peso asignado a cada una de estas categorías. Elaboración propia. ....	374
Tabla 4.30. Figuras de protección consideradas en el análisis y peso asociado a ellas. Elaboración propia. ....	375
Tabla 4.31. Categorías que conforman el indicador que analiza las restricciones por figuras de protección, peso asociado y explicación. Elaboración propia. ....	376
Tabla 4.32. Categorías que configuran el indicador afectaciones al paisaje y peso asociado. Elaboración propia. ....	379
Tabla 4.33. Dimensiones, indicadores y categorías empleadas en el análisis. Pesos asociados a los indicadores para los diferentes tipos de recursos estudiados y peso asociado a las categorías que componen los indicadores. Elaboración propia .....	382
Tabla 4.34. Categorías de potencialidad minera en función del cruce de resultados dimensionales. Elaboración propia.....	385

## CAPÍTULO VI

Tabla 6.1. Criterios de evaluación de las rocas generadoras. Basado en la clasificación propuesta por McCarthy (Boyer, Clark, Jochen, Lewis, y Dallas, 2011). ....	483
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

# Capítulo I: Introducción. Motivación personal, oportunidades, objetivos y estructura de los contenidos

1.1. Motivación personal

1.2. Oportunidades

1.3. Objetivos

1.4. Estructura de los contenidos

1.5. Agradecimientos

## **INTRODUCCIÓN. MOTIVACIÓN PERSONAL, OPORTUNIDADES, OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DE LOS CONTENIDOS**

En este primer capítulo serán establecidas las bases que definen el contexto de la investigación realizada, comenzando por una breve introducción de la temática tratada en la tesis y de las motivaciones personales que llevaron a seleccionarla. También será presentado el contexto académico en el que se enmarca la tesis y las implicaciones derivadas del contexto institucional.

Finalmente, serán expuestos los objetivos marcados al principio de la investigación, así como el modo en el que se estructuran los contenidos presentados.

## 1.1. MOTIVACIÓN PERSONAL

La minería y todo lo que envuelve es un tema que siempre me ha resultado apasionante. No en vano, la localidad donde crecí y resido actualmente, Monreal del Campo, se localiza a menos de 20 minutos de las minas de hierro de Sierra Menera, en Ojos Negros. Tampoco se encuentran lejanas las cuencas ligníferas de Utrillas-Aliaga. En ambas zonas, que en otro tiempo fueron espacios muy dinámicos dentro del contexto territorial de la provincia de Teruel, el cese de la actividad minera ha causado un profundo impacto en el territorio, en la población y en las formas de vida de sus habitantes.

Aunque la Compañía Minera de Sierra Menera decidió cesar la actividad mediante un expediente de regulación de empleo para la rescisión de contratos en 1987 (Serrano González, 1995), solo pocos meses después de mi nacimiento, a lo largo de los años he podido ser testigo directo de las consecuencias que esta decisión supuso para la localidad de Ojos Negros, que entre el año 1981 y 2001 perdió casi el 50% de su población (IAEST, 2019) y, especialmente, para el barrio minero de Sierra Menera, hoy prácticamente abandonado. Parte de los trabajadores de esta explotación fueron recolocados en PYRSA (Piezas y Rodajes S.A.), inaugurada en Monreal del Campo en el año 1990, como parte del proceso de reconversión y desmantelamiento de estas minas (Pérez Boned, 2015). De este modo, la localidad se vio beneficiada de un modo indirecto de la decisión tomada por la compañía minera.

En un sentido contrario, a lo largo de los últimos años he podido constatar personalmente como la apertura de una planta de embotellado de agua mineral natural en Bronchales (Agua de Bronchales S.A.), localidad de la que procede gran parte de mi familia y donde ahora mismo me encuentro escribiendo este texto, ha supuesto un revulsivo para la economía de la localidad, atrayendo familias jóvenes con niños en edad escolar. La inauguración de esta nueva actividad económica no solo ha permitido frenar un proceso de despoblación que comenzó en la década de los 40 del siglo pasado, sino que en el año 2017, y por primera vez en mucho tiempo, la cifra oficial de población creció.

He de decir, que uno de los logros personales más satisfactorios derivados del proceso de elaboración de la tesis presentada ha sido comprender más profundamente los factores que se esconden detrás de los procesos y situaciones reales apenas descritas.

De este modo, cuando en una reunión con el Dr. Antonio Valero, director del CIRCE (Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos) y con mi directora de tesis, la Dra. Ana Escalona, se sugirió la posibilidad de desarrollar un inventario completo de los recursos minerales, energéticos y de las aguas de Aragón, lo acepté sin dudarlo.

Académicamente, ya durante mi formación como geólogo tuve la oportunidad de profundizar en los procesos que generan los depósitos minerales, la distribución y características de los principales yacimientos presentes en mi comunidad, Aragón, y los grandes cuerpos mineralizados a nivel mundial, los métodos de extracción de recursos más comunes, así como pequeñas pinceladas referentes a la legislación minera y a los mercados donde se venden estos productos. Si la minería es ya de por sí una materia interesante, todos los procesos que envuelven la formación y explotación de los combustibles fósiles no lo son menos. Así, en el periodo Erasmus que transcurrió en la Universidad de Bolonia durante mi formación como geólogo, tuve la oportunidad de cursar la asignatura *Geologia del Petrolio*, impartida por los profesores Antonellini y Casolini. No obstante, en aquella época el *fracking*, que como podrá ser comprobado en capítulos posteriores, se configura como un tema central de la tesis, todavía comenzaba a implantarse como una forma de recuperación de hidrocarburos, sin intuirse la importancia que adquiriría pocos años después.

Afortunadamente, los múltiples vértices, más allá del puramente geológico, que componen la realidad de la minería facilitaron la inserción de la temática elegida con el principal campo de investigación y docencia de la Dra. Escalona, es decir, la Geología Económica y Humana y con el Programa de Doctorado en Ordenación del Territorio y Medio Ambiente que marca el contexto académico de esta tesis.

Y es que la minería y la recuperación de hidrocarburos son mucho más que la simple extracción de un recurso con fines económicos. Los importantes impactos en el medioambiente derivados de las labores extractivas hacen que esta actividad genere un fuerte rechazo en la sociedad, así como que en diversas localizaciones se establezcan fuertes

limitaciones a su implementación, o incluso su total prohibición. No son menores las externalidades generadas al ser humano. Por un lado, pueden ser una fuente de empleo y de revitalización de áreas rurales deprimidas, pero por otro, tienen la capacidad de modificar profundamente las actividades que se desarrollaban previamente en el entorno, así como de alterar las formas de vida tradicionales.

Por todos estos factores se juzgó crucial avanzar más allá de la elaboración de una simple fotografía de los recursos presentes en el territorio, creando un análisis que estudie como los condicionantes previamente descritos se combinaban entre sí en cada uno de los yacimientos presentes en la comunidad aragonesa.

En el análisis propuesto para tal fin, la información espacial juega un papel crucial a la hora de establecer las relaciones existentes entre los recursos incorporados al inventario, el territorio y sobre lo que él se localiza. De este modo, la utilización de los Sistemas de Información Geográfica (*SIGs*) para manipular y trabajar con la información espacial fue de una enorme importancia en este estudio, tanto, que se les dedicará un capítulo entero de la tesis. Debo confesar que la etapa de ejecución del análisis empleando estas herramientas fue la más entretenida y satisfactoria de todas.

La primera vez que utilicé este tipo de programas fue durante el Máster Universitario en Ordenación Territorial y Medioambiental que da acceso este Programa de Doctorado, y aunque en un principio pudieron resultar complicadas, pronto logré dominarlas y disfrutar trabajando con ellas. Tanto es así que, poco después de comenzar a desarrollar esta tesis, y apoyado siempre por mi directora, decidí seguir formándome en el uso de este tipo de herramientas e inscribirme en el Máster en Sistemas de Información Geográfica que ofrece ESRI España, compañía desarrolladora de *ArcGIS*. Con la perspectiva del tiempo, juzgo esta decisión como completamente acertada, puesto que, posiblemente, muchos de los análisis efectuados no hubieran podido ser realizados sin esta formación extra.

En cualquier caso, durante todos estos años no solo he continuado formándome en el mundo de los Sistemas de Información Geográfica, sino que he intentado seguir cualquier curso o congreso que pudiera ser interesante de cara a la elaboración de la tesis y despertara mi curiosidad. De este modo, poco después de comenzar en el programa de

doctorado cursé diversas asignaturas de la rama de la Geografía Humana en la UNED, para adecuar mi formación previa como Licenciado en Geología al marco académico del programa de doctorado. Una de estas materias despertó en mí un interés por encima del resto. Se trata de la Geopolítica, de la cual apenas tenía unas nociones básicas, pero que pronto se convirtió en una gran pasión. Así, cuando descubrí, casi por casualidad, el curso impartido por el Coronel del Ejército de Tierra D. Pedro Baños, *Geopolítica de los recursos naturales*, no dudé en matricularme. La formación recibida durante este curso fue de vital importancia para el desarrollo de la tesis.

Por otra parte, de entre todos los cursos realizados me gustaría destacar de un modo especial el impartido de forma extraordinaria por el Dr. Antonio Valero y la Dra. Alicia Valero, *Energía, economía y sostenibilidad*, que no solo me fue útil en la elaboración de la tesis, sino también personalmente para descubrir y comprender un poco mejor el modo en el que funcionan diversos aspectos del mundo actual.

## 1.2. OPORTUNIDADES

Este subapartado comienza con una breve introducción al tema tratado en esta tesis, el cual ha motivado el trabajo realizado a lo largo de estos años. Por otro lado, serán incorporados los factores que han marcado el contexto académico e institucional del proyecto aquí presentado.

### 1.2.1. Temática

Aragón cuenta con una larga tradición minera, que comienza durante la Edad de Piedra, con los primeros pobladores de la región, y que se extiende hasta nuestros días. Durante la ocupación romana de la Península Ibérica la industria metalúrgica del área del Moncayo alcanzó un gran prestigio. También en esta época se comenzó a extraer sal común de las minas de Remolinos (Zaragoza). Por otro lado, los elementos ornamentales del Palacio de la Aljafería de Zaragoza son un magnífico vestigio de los trabajos con yeso y alabastro procedentes de la dominación árabe del territorio. Ya de esta época datan los primeros testimonios arqueológicos que indican la extracción de hierro en el entorno de Sierra Menera (Ojos Negros, Teruel). Asimismo, existen referencias que describen la explotación de

metales como la galena, la plata, el manganeso, el cobre o el antimonio en distintas ubicaciones de la región durante la Edad Moderna.

Sin embargo, el recurso que probablemente haya marcado de una forma primordial el devenir de la región (amén del hierro, la halita, el yeso y el alabastro, mencionados en el párrafo anterior) sea el carbón. Se tienen noticias sobre el aprovechamiento de este recurso en las cuencas ligníferas turolenses de Utrillas-Aliaga y Oliete-Andorra-Estercuel desde la segunda mitad del siglo XVIII. Hacia el año 1917 comienza la minería industrial del carbón en Aragón (Rubio Navas, Corral Lledó, Alberruche del Campo, Marchán Sanz, y Pérez Cerdán, 2012), en las cuencas turolenses y en la de Mequinenza, que trajo prosperidad a las comarcas en las que se extrajo este recurso.

A pesar de la pérdida de relevancia que ha experimentado en las últimas décadas el sector minero del lignito y de los minerales metálicos, la minería empleaba en el año 2015 a 1140 trabajadores de forma directa, relacionados, principalmente, con la extracción de productos de cantera. En algunas comarcas como Andorra-Sierra de Arcos, la Ribera Baja del Ebro, el Bajo Martín y las Cuencas Mineras, la minería continúa suponiendo un porcentaje elevado del valor añadido total.

Cabe destacar que la minería presenta muchas características que hacen de ella una actividad económica muy diferente del resto, como el valor localizado y la temporalidad del producto, que serán abordadas en el Capítulo II de la tesis. Los elementos minerales son un recurso finito y geológicamente restringido a aquellas áreas donde se presentan de forma natural, lo que fomenta la competencia entre las naciones por el control y acceso a los cuerpos mineralizados. Además, los recursos minerales son esenciales para el funcionamiento de las sociedades modernas, y, en algunos casos, su importancia económica va emparejada con posibles riesgos en el suministro, razón por la cual la Unión Europea considera alguno de estos recursos como elementos críticos para su industria y su economía.

La región europea es altamente dependiente de la importación de estas materias primas, de modo que las interrupciones en el suministro por motivos económicos, geopolíticos o de otra índole pueden poner en peligro la competitividad de algunos sectores industriales –

industria química, del automóvil, telecomunicaciones...–, amenazando el funcionamiento de la economía en general.

Por ello, la Unión Europea, a través de la *“Raw Materials Initiative –meeting our critical need for growth and jobs in Europe”*, fijó varios objetivos en relación con el acceso a los elementos críticos no energéticos, entre los que destaca fomentar el abastecimiento sostenible desde los propios países de la UE. Como parte del *European Innovation Partnership’s Strategic Implementation Plan*, la Unión Europea creó el servicio *European Raw Materials Knowledge Base (EURMKB)* que, con la ayuda de los países de la UE, recopilará, almacenará, actualizará, analizará y difundirá la información sobre las materias primas críticas presentes en territorio europeo.

Para aumentar el abastecimiento desde territorios de la propia Unión es necesaria una adecuada ordenación territorial de tales recursos, lo que confiere a las regiones un papel clave. De hecho, por lo que respecta a Aragón, el II Plan Autonómico de Investigación, Desarrollo y Transferencia de Conocimientos, en el capítulo *“Desarrollo del territorio aprovechando sus características específicas”*, pone énfasis en la *“interacción entre población y territorio y la implantación de actividades económicas y uso de recursos”* (Martínez, Martínez, y Gavín, 2008). Por otra parte, a pesar de no mencionar explícitamente los elementos críticos, la minería es una de las cuestiones fundamentales que aparecen recogidas en la Estrategia de Ordenación Territorial de Aragón, en el apartado de Recursos y Condicionantes Naturales (Departamento de Política Territorial e Interior, 2014).

Por tanto, es esencial para los territorios conocer los recursos minerales con los que cuenta a la hora de abordar su Planificación Territorial y sus estrategias futuras respecto a este tema. Sin embargo, en la actividad minera no solo intervienen factores geológicos, puesto que las implicaciones sociales, económicas y medioambientales son muy relevantes. De esta forma, antes de afrontar cualquier estudio sobre los recursos minerales, se torna necesaria la incorporación de variables e indicadores que valoren los aspectos sociodemográficos, económicos, geopolíticos, geológicos y ambientales que se desprenderían de una eventual puesta en marcha de la actividad minera ligada a ellos.

Una de las características fundamentales de la minería está relacionada con los elevados impactos ambientales y sociales que genera. Por ello, y a pesar de su importancia para la economía y el mantenimiento de las formas de vida, la minería provoca un gran rechazo entre la opinión pública. De este modo, en las últimas décadas, las autoridades y las empresas del sector buscan encaminar sus acciones hacia el concepto de minería sostenible, que se basa en tres pilares fundamentales: el desarrollo económico, la protección del medio ambiente y el respeto por el ser humano. Para ello se sirven de algunas herramientas, como las evaluaciones de impacto ambiental y social y los planes de cierre de minas, que persiguen fomentar los preceptos de la sostenibilidad en las labores extractivas.

En esta tesis será tratado otro tema relacionado con la extracción y aprovechamiento de los recursos geológicos, concretamente, se hablará de los hidrocarburos y su posible explotación en la región mediante el uso de la técnica conocida como *fracking*. El desarrollo de la fractura hidráulica se ha convertido en los últimos años en una pieza clave del entramado geopolítico mundial, otorgando a Estados Unidos, país pionero en el desarrollo y ejecución de esta técnica, importantes ventajas económicas, industriales y geopolíticas. Esta se basa en la liberación de los hidrocarburos almacenados en rocas muy poco permeables, a través de la creación de fracturas inducidas por la inyección de agua, arena y otros agentes químicos a grandes presiones. Los fuertes impactos derivados de su aplicación han provocado airadas protestas entre los grupos ambientalistas a nivel global.

Todos estos temas serán tratados ampliamente a lo largo de la tesis presentada, especialmente en el Capítulo II, que se establece como marco bibliográfico del trabajo desarrollado.

### 1.2.2. Contexto Académico

La tesis aquí presentada fue desarrollada dentro del Programa de Doctorado en Ordenación del Territorio y Medio Ambiente, perteneciente al Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio de la Universidad de Zaragoza. Como expone su página web, este Departamento cuenta con una dilatada historia de más de treinta años en la formación de doctores, que desde 1995 se encuadra dentro del programa antes mencionado. Este programa de doctorado fue distinguido en 2009 con la Mención hacia la Excelencia por el

Ministerio de Educación en los cursos 2011-12, 2012-13 y 2013-14. La versión actual del programa se encuentra a la espera de dicha evaluación.

Los estudios de doctorado en el Departamento de Geografía de la Universidad de Zaragoza presentan un alto grado de interdisciplinariedad, tanto por la diversa formación académica de los estudiantes que los realizan como por la distinta procedencia de sus profesionales. De toda esta diversidad emergen numerosas líneas de investigación relacionadas con la Ordenación del Territorio y los problemas del Medio Ambiente.

Cabe destacar en este punto que parte del contenido de la tesis fue desarrollado dentro del proyecto “Los recursos energéticos y el desarrollo territorial de Aragón. Análisis y propuestas en un nuevo escenario global”, financiado por el Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón (IUCA), perteneciente a la Universidad de Zaragoza.

El contenido de este proyecto, desarrollado entre los meses de enero de 2015 y enero de 2016, se enmarcaba en la línea de investigación “Desafíos globales e impactos locales” puesta en marcha por el Grupo de Estudios de Desarrollo Territorial (GEDETUZ), al cual pertenecía una de las directoras del proyecto, la Dra. Ana Escalona. Por otra parte, dicho proyecto se benefició de la trayectoria investigadora del grupo Reconstrucciones Paleoambientales, al cual pertenecía el otro director, el Dr. Marcos Aurell. De este modo, fue posible aunar la experiencia de ambos grupos en un proyecto interdisciplinar.

Los objetivos del proyecto realizado se enmarcaron en la necesidad de fundamentar de forma apropiada el estudio sobre el presente y futuro de los recursos energéticos de la Comunidad Autónoma de Aragón. Para ello, debían ser analizados aspectos como su empleo de forma eficiente y sostenible y su impacto en el desarrollo territorial, específicamente, en el de las áreas productoras.

Más concretamente, el primero de los objetivos de este proyecto coincidía con el establecimiento de un inventario actualizado y un diagnóstico contextualizado de los recursos energéticos de Aragón, evaluando su potencial minero. Por otro lado, se juzgó

necesaria la obtención de elementos para la elaboración de propuestas encaminadas al aprovechamiento eficiente, sostenible y equilibrado de estos recursos.

De este modo, el trabajo desarrollado se centró en el estudio de dos tipos fundamentales de recursos energéticos. Por un lado, se examinaron los depósitos de carbón existentes en la comunidad, tanto los de la Fm. Escucha en las Cuencas Mineras, como los pertenecientes a las unidades del Terciario de la Cuenca del Ebro (Mequinenza). Por otro lado, fue analizado el potencial algunas unidades geológicas aflorantes en la región como rocas madre de hidrocarburos.

Por otro lado, dentro del programa Erasmus + se realizó una estancia doctoral en el Laboratorio de Análisis y Representaciones Territoriales y Urbanas (*Laboratorio di Analisi e Rappresentazione Territoriale e Urbane*, LARTU) del Politécnico de Turín. Durante los cinco meses que duró la estancia, además de mejorar en diversos aspectos cartográficos y técnicos los contenidos de la propia tesis doctoral, pude trabajar, gracias a las Dras. Taddia y Bottero y al Dr. Lo Russo, en la elaboración del Mapa de Canteras del Piamonte, englobado dentro del Plan Regional de las Actividades Extractivas (*Piano Regionale delle Attività Estrattive*, PRAE).

### 1.2.3. Contexto Institucional

Más allá del contexto académico, descrito en el subapartado anterior, y que se enmarca dentro del Programa de Doctorado en Ordenación del Territorio y Medio Ambiente, ofrecido por el Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio de la Universidad de Zaragoza, el marco institucional adquiere en esta tesis un peso muy importante.

Gracias a los contactos iniciados por el Dr. Antonio Valero director del Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos (CIRCE) con la Consejería de Industria e Innovación del Gobierno de Aragón, y tras presentar el trabajo a desarrollar en esta tesis en la sede del Gobierno, el 17 de octubre de 2014 se firmó un convenio de colaboración para el desarrollo de actividades investigadoras en el sector energético y minero de Aragón (iUNIZAR, 2014). Concretamente, los firmantes de dicho acuerdo fueron el Gobierno de Aragón, la Universidad de Zaragoza y la Agrupación de Empresas Mineras de Aragón (AEMA).

Por medio de este convenio, que derivó en diversas reuniones con los firmantes del acuerdo, con la Dirección General de Energía y Minas y con la Jefatura de Promoción y Desarrollo Minero del Gobierno de Aragón, se tuvo acceso a una gran cantidad de material documental fundamental para el desarrollo de esta tesis.

### 1.3. OBJETIVOS

El principal resultado esperable del proceso de elaboración de la tesis coincide con la determinación del potencial minero global de la Comunidad Autónoma de Aragón a través de la creación de un inventario completo de los depósitos e indicios minerales con los que cuenta la región. Los registros que componen el inventario, referentes a minas, canteras, yacimientos o indicios, serán valorados según su interés en función de las particularidades geológicas del cuerpo mineralizado y del carácter crítico del yacimiento, de la aptitud del territorio para soportar las externalidades derivadas de las labores extractivas y de su inserción dentro del contexto geográfico donde se localizan, estimando aspectos sociales, económicos y ambientales.

El cumplimiento de los objetivos planteados supone, en primer lugar, el desarrollo de una base de datos de tipo geográfico, es decir, que combine información espacial definida por una serie de coordenadas y un conjunto de atributos asociados a esas entidades espaciales. Esta geobase de datos estará referida a las minas y canteras, tanto las activas en la actualidad como las ya desmanteladas, así como a los yacimientos e indicios minerales presentes en la C.A. de Aragón que no han sido sujeto de explotación ni en la actualidad ni históricamente. En otras palabras, se pondrá a punto un completo inventario de lugares que albergan, han albergado o podrían albergar recursos minerales y energéticos en Aragón.

Además, se recogerá toda la información necesaria para evaluar el empleo de estos recursos de forma sostenible y respetuosa con la naturaleza y la población, y cómo pueden insertarse en las actuales estrategias de ordenación del territorio para contribuir al desarrollo aragonés y, específicamente, al de las áreas productoras. Para lograr este fin se crearán una serie de indicadores que valoren los recursos inventariados y los lugares donde estos se localizan en tres dimensiones fundamentales: *geológica, socioeconómica y ambiental*.

La primera de estas dimensiones analiza las características geológicas del cuerpo mineralizado o del acuífero que nutre las explotaciones de agua, así como el carácter crítico del recurso estudiado. En el caso de los hidrocarburos no convencionales esta dimensión valorará el potencial como roca madre de ciertas formaciones geológicas presentes en la comunidad. Los indicadores que componen esta dimensión tratan de dar respuesta a una cuestión clave en la fase de exploración minera, concretamente, si el yacimiento presenta un interés económico y estratégico suficiente como para plantear su explotación. No obstante, cabe destacar que este análisis se trata de una simplificación que permite comparar entre sí los diferentes registros que componen la base de datos generada, puesto que los estudios de viabilidad realizados por las empresas del sector de forma previa a la implantación de cualquier proyecto destinado a la explotación de recursos minerales son complejos y específicos para cada cuerpo mineralizado. Estos análisis contemplan numerosos factores relacionados con las características del cuerpo mineralizado, incluyendo la evaluación de las reservas de mineral, métodos de explotación aplicables y selección de equipos, estudios geotécnicos encaminados a definir las geometrías de las excavaciones, esquemas de tratamiento mineral y de implantación e infraestructura del proyecto...; así como análisis económicos y financieros como el estudio de la mano de obra disponible y sus costes, estudios de mercado o estudios de economías de escala y de dimensionamiento de las explotaciones (IGME, 1993).

La componente denominada *Aptitud del terreno* estudia la adecuación del territorio donde se ubica el yacimiento para soportar las perturbaciones en el medio ambiente derivadas de la actividad minera, analizando aspectos como el potencial de generación y propagación de drenajes ácidos contaminantes procedentes de la explotación minera, la pendiente en el entorno del yacimiento o la facilidad que presentan los acuíferos para reponer las aguas extraídas. Dentro de esta dimensión se han incluido los riesgos geológicos y climáticos, no solo por los daños que estos eventos pueden provocar en la maquinaria, las infraestructuras y a los propios trabajadores de la explotación minera, sino porque estos procesos podrían actuar como desencadenantes de otros impactos medioambientales relacionados con la actividad extractiva, como la rotura de balsas por eventos sísmicos o lluvias torrenciales que liberen grandes cantidades de materiales tóxicos a la red hidrográfica. Afortunadamente, existen numerosos métodos destinados a evitar o, cuando

no sea posible, a minimizar los efectos de la minería en el medio ambiente y a corregir las perturbaciones generadas cuando el impacto sea inevitable.

La tercera dimensión empleada en el análisis de los registros incorporados a la base de datos, que recibe el nombre de *Inserción socioeconómica*, estudia elementos relacionados con la integración de la actividad minera con la población del territorio en la que se asientan los yacimientos, tanto de forma directa como a sus intereses (económicos, ambientales, estéticos, afectivos, etc.), con el objetivo de determinar si la potencial explotación asociada al recurso generará un beneficio mayor que los impactos que producirá en el medio natural y humano.

Por otra parte, con la finalidad de difundir la información recolectada en la base de datos, así como para poder divulgar de forma visual y accesible los resultados obtenidos en el análisis, será generada una plataforma de consulta de los datos de la tesis en forma de una aplicación web de tipo geográfico. Los datos incorporados a la aplicación vendrán geolocalizados de modo que, además de poder ser consultados los datos alfanuméricos relativos a las características y a los resultados del análisis de cada registro del inventario, se mostrará su distribución espacial sobre el territorio aragonés.

Uno de los objetivos principales planteados consiste en la elaboración de un paquete de herramientas de geoprocésamiento que permitan facilitar la tarea de exportación del flujo de trabajo empleado en el análisis de interés a otros contextos geográficos, reduciendo enormemente los tiempos de trabajo. De esta forma, empleado como datos de entrada los registros correspondientes a los recursos presentes en otros contextos territoriales y substituyendo los datos geográficos auxiliares referentes a la Comunidad Autónoma de Aragón por los del territorio en cuestión, las herramientas generadas podrán automatizar los análisis espaciales y los cálculos matemáticos pertinentes hasta obtener los resultados finales.

En síntesis, los objetivos propuestos inicialmente son los siguientes:

1. Establecer una tipología y un diagnóstico actualizados de los recursos mineros y aguas de Aragón, prestando especial atención a los catalogados como críticos por la UE.
2. Analizar y evaluar el potencial de aprovechamiento de estos recursos y el impacto territorial previsible que supondría la puesta en marcha de una actividad minera ligada a ellos.
3. Generar el paquete de herramientas oportuno para la traslación de la metodología de análisis propuesta a otros territorios, minimizando los tiempos de trabajo, y crear una plataforma de visualización que permita difundir los resultados del estudio.

Por otra parte, cabe destacar que parte del trabajo presentado en esta tesis fue financiado por el Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón (IUCA) de la Universidad de Zaragoza, dentro del proyecto “Los recursos energéticos y el desarrollo territorial de Aragón. Análisis y propuestas en un nuevo escenario global”. El objetivo central de este proyecto, que como su propio nombre indica se centra en el estudio de los recursos energéticos existentes en la Comunidad Autónoma de Aragón, está relacionado con el análisis del potencial como rocas madre de hidrocarburos de ciertas formaciones geológicas que afloran en la región. Se trata de unidades del Carbonífero que se formaron en cuencas marinas, y que afloran ampliamente en el núcleo Paleozoico del anticlinal de Montalbán, niveles carbonosos de la formaciones Escucha y Utrillas, potenciales generadoras de metano, así como varias unidades margosas ricas en materia orgánica de edad jurásica de formaciones geológicas como Turmiel (Toarciense) y Sot de Chera (Oxfordiense terminal).

Para lograr esta meta, se seleccionaron determinadas localizaciones donde afloran estas unidades geológicas con el fin de elaborar series estratigráficas que incluyan los niveles ricos en materia orgánica y la toma de muestras para poder efectuar análisis que determinen su contenido en carbono orgánico (TOC), valor fundamental para determinar su potencial para la generación de hidrocarburos. Los resultados de estos análisis serán incorporados a la base de datos generada, incluyéndose como registros dentro del grupo de los recursos energéticos. Una vez agregados como entidades espaciales según la ubicación del lugar donde fueron tomadas las muestras, se estudiará, como en el resto de los recursos

incorporados en la base de datos, su inserción socioeconómica y la aptitud del territorio para soportar las actividades ligadas al proceso extractivo, si bien estos puntos presentan ciertas peculiaridades en su análisis que serán descritas a lo largo de la tesis.

#### 1.4. ESTRUCTURA DE LOS CONTENIDOS

Los contenidos de esta tesis se encuentran estructurados en siete capítulos diferentes, a los que serán incorporados tres anexos adicionales. Cada capítulo presenta aspectos diferentes relativos al proceso de trabajo seguido en la tesis, desde el estudio bibliográfico previo hasta la descripción de los resultados y conclusiones obtenidas.

A continuación, serán expuestos sistemáticamente los capítulos que componen la tesis, el título otorgado, así como una breve descripción de sus contenidos.

En el **Capítulo I**, denominado *Introducción. Motivación personal, oportunidades, objetivos y estructura de los contenidos*, son incorporados elementos como la elección de la temática tratada, los antecedentes de la tesis, el contexto académico e institucional, los objetivos de la tesis y la estructuración de los contenidos.

En el **Capítulo II**, *Interés de la cuestión: las dimensiones clave de una minería sostenible y de su análisis en un contexto de competencia global*, se asientan los principales conceptos teóricos relativos a la actividad minera y a la fractura hidráulica, así como a los impactos derivados de ambas, el desarrollo sostenible y la competencia global por el acceso a los recursos. Estos conceptos fueron empleados como criterios en el proceso de elaboración del análisis del potencial minero de los recursos minerales, energéticos y aguas de la Comunidad Autónoma de Aragón.

El **Capítulo III**, *Elementos y ámbito de estudio*, contextualiza el trabajo desarrollado en dos vertientes fundamentales. Por un lado, se describe la metodología utilizada en la adquisición de los datos necesarios para la realización de la base de datos y los recursos en ella incorporados, diferenciados en función de su naturaleza en una serie de categorías. En la descripción de los recursos se analizan aspectos como su abundancia relativa y su distribución en el territorio aragonés, prestando una especial atención a los elementos considerados como críticos en los informes de la Unión Europea, así como a las unidades

rocosas susceptibles de actuar como rocas madres de hidrocarburos. En la segunda parte del capítulo se contextualiza el territorio en el que se ubican los recursos apenas descritos, considerando de un modo más destacado aquellos elementos empleados en la resolución de los indicadores que componen cada una de las tres dimensiones del análisis.

El **Capítulo IV**, *La geobase de datos. Diseño del análisis multicriterio, posibilidades y criterio de manejo de los diversos indicadores*, incorpora la explicación de la metodología empleada en la ejecución del análisis de interés minero, incluyendo una descripción de los indicadores empleados en la resolución de cada una de las tres grandes dimensiones propuestas: *Perfil geológico, Aptitud del Terreno e Inserción socioeconómica*.

En el **Capítulo V**, *Herramientas para la generación, análisis y presentación de la base de datos*, se describe la importancia de la utilización de los Sistemas de Información Geográfica en los análisis espaciales, en general, y en esta tesis, en particular. De este modo, se incluyen aspectos como los tratamientos necesarios para la utilización de la información cartográfica auxiliar para la resolución de los indicadores o la generación de la cartografía complementaria incorporada a la tesis. Asimismo, en este capítulo se incorpora el proceso de creación de las herramientas adaptables que permitan la exportación de la metodología empleada a otros contextos geográficos, así como la creación de la plataforma virtual de visualización de los resultados.

En el **Capítulo VI**, *Diagnóstico de los recursos minerales, energéticos y aguas de Aragón en un contexto de sostenibilidad y competencia global*, se describen los resultados obtenidos por los registros incorporados a la base de datos sometidos al análisis de interés minero. Se presta especial atención a los recursos considerados como críticos por la Unión Europea y a las formaciones geológicas que afloran en la Comunidad Autónoma de Aragón y que podrían ser susceptibles de explotación como roca madre de hidrocarburos mediante el uso de la técnica conocida como fractura hidráulica.

El **Capítulo VII**, *Recapitulación final*, repasa el cumplimiento de los objetivos marcados al comienzo de la tesis, analizando la metodología seguida para su consecución y los principales resultados obtenidos. También incluye diversas acciones establecidas como

líneas de actuación una vez acabada la tesis y se aportarán algunas breves consideraciones sobre el trabajo realizado.

En lo que respecta a los anexos:

El **Anexo I**, que recibe el nombre *Cartografía sistemática de los indicadores espaciales del análisis para una evaluación del interés de explotación de los recursos mineros de Aragón*, presenta una serie de mapas en los que se plasma el comportamiento del territorio en su conjunto ante el desarrollo de potenciales labores mineras siguiendo los criterios establecidos para la valoración de los puntos inventariados.

En el **Anexo II**, *Construcción y ejemplos de aplicación de la plataforma de visualización*, se narra el proceso de creación de la plataforma de visualización de la información contenida dentro de la base de datos generada referente a los recursos minerales, energéticos y aguas de Aragón, así como los resultados obtenidos en el análisis de interés minero propuesto. Además, en este anexo vendrán incluidas las características de las herramientas incorporadas que dotan de una mayor capacidad de interacción a la aplicación creada.

Finamente, el **Anexo III** incorpora el *Convenio de colaboración entre el Gobierno de Aragón, la Universidad de Zaragoza y la Agrupación de Empresas Mineras de Aragón (AEMA) para el desarrollo de actividades investigadoras en el sector energético y minero de Aragón*.

## 1.5. AGRADECIMIENTOS

Quiero aprovechar este apartado para dar las gracias a todas aquellas personas que, de uno u otro modo, me han ayudado a lo largo de este proceso. Sin ellos, todo esto no hubiera sido posible.

Al Dr. Antonio Valero, por ayudarme a reconducir la temática de la tesis hacia una materia tan interesante y con tantas posibilidades como la minería, así como por tender puentes e iniciar los contactos con los responsables políticos del Gobierno de Aragón. A la Dra. Alicia Valero, por su búsqueda incansable de proyectos en los que insertar el trabajo desarrollado en esta tesis.

A los miembros de la Comisión de Seguimiento del Convenio de Colaboración entre el Gobierno de Aragón, la Universidad de Zaragoza y la Agrupación de Empresas Mineras de Aragón, por el apoyo documental recibido y por escuchar con tanta atención las ideas propuestas. En especial, quiero mostrar mi gratitud a Rita Martínez, Responsable de atención a las empresas de ANEFA (Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos), por haberme hecho llegar los cuadernos correspondientes al Plan Estratégico 2012-2025 del Sector de los Áridos, los cuales estudié con mucha atención.

A Jaime Sirvent, Jefe de Promoción y Desarrollo Minero, y a José Ignacio Urbizu, Jefe de la Sección de Estudios y Planes Geomineros del Gobierno de Aragón, por el apoyo documental prestado, por su atención durante las diversas reuniones mantenidas y por las ideas aportadas para el enriquecimiento de la información contenida en la base de datos y el perfeccionamiento de los criterios empleados en el análisis del potencial minero de los recursos aragoneses.

A los miembros del Instituto Universitario de Ciencias Ambientales, por haberme dado la posibilidad de trabajar en un proyecto tan enriquecedor como el que pude realizar con ellos. Al Dr. Marcos Aurell, codirector de este proyecto, por todo el interés y la ayuda prestados tanto durante como después del mismo.

A todos los profesores con los que tuve el gusto de coincidir durante mi etapa de formación en la Facultad de Geología. A los profesores del Máster en Ordenación Territorial y Medioambiental, especialmente a la Dra. Paloma Ibarra, directora de mi Trabajo de Fin de Máster, de la que conservo un grato recuerdo. A la Dra. Maite Echeverría, por el interés mostrado en mi trabajo desde el primer momento en el que comencé en el programa de doctorado.

A los profesores del Máster en Sistemas de Información Geográfica, Laura Razola y Carlos Henche, por su ayuda en la elaboración de la primera versión de la aplicación para la visualización de los resultados de la tesis.

A todos los integrantes del Grupo de Estudios en Minería y Medioambiente, que reúne a un grupo brillante de geólogos españoles y chilenos especializados en el estudio de los

impactos ambientales derivados de la minería, por la calidad de sus publicaciones. Sin estas, el análisis realizado en la tesis no hubiera podido ser tan completo. Especialmente, quiero agradecer a los Drs. Pablo Higuera y Javier Lillo su disponibilidad para formar parte del tribunal de esta tesis, deseándoles que este proceso les resulte satisfactorio.

Al Dr. Lorenzo Reyes por el interés mostrado en la realización del informe sobre la tesis como doctor experto en la materia procedente de una institución extranjera.

Al Dr. Marco Santangelo por ser la persona que efectuó los trámites necesarios para que mi estancia doctoral en Turín fuera posible. Al Dr. Lo Russo, mi coordinador durante este periodo, y a las Dras. Marta Bottero y Glenda Taddia, por darme la posibilidad de colaborar con ellos en un proyecto tan bonito y que disfruté tanto. Mi agradecimiento especial a la Dra. Taddia por todos los documentos e informes que le ha tocado rellenar por mi culpa. Muchas gracias por todo, Glenda.

A Antonio Cittadino, director del LARTU, centro en el que realicé estas prácticas doctorales, y a todos los técnicos del laboratorio.

Al Programa CAI-Ibercaja de Estancias de Investigación, por financiar una parte de la estancia.

A Panos, mi compañero de piso durante aquellos meses, y a mis colegas de laboratorio, por hacerme descubrir esa magnífica ciudad. A Francesco, por ofrecerme su amistad desde el primer momento en el que pisé el laboratorio y por su ayuda inestimable con el idioma.

A María, Irene, Vidal, Jagoba, María José, Anru, Ramón, Patry, Raquel, Andrea, Laura, Ruth, Menchu... y tantas otras personas que de una u otra forma me han acompañado, cuando no soportado, a lo largo de todos estos años. A Angela, por sus ánimos constantes y por su gran ayuda con los textos en italiano.

A mi familia. A mis hermanos Sandra y Eduardo. A mi sobrino Alejandro, para que un día entienda porque estaba siempre con el ordenador en vez de jugando con él.

A mi tío Juan Pedro, al que echo mucho de menos, por su compañía durante todos estos años y porque sé, que allí donde esté, estará orgulloso de mí.

A mi directora de tesis y guía en este proceso, la Dra. Ana Escalona, por sus ideas, su esfuerzo, apoyo e interés constantes, que siempre han ido más allá de sus funciones como directora. Por su paciencia y comprensión durante las situaciones complicadas.

*A mi madre, por TODO.*

# Capitolo I (Italiano): Introduzione. Motivazioni personali, opportunità, obiettivi e struttura dei contenuti

1.1. Motivazioni personali

1.2. Opportunità

1.3. Obiettivi

1.4. Struttura dei contenuti

1.5. Ringraziamenti

## **INTRODUZIONE. MOTIVAZIONI PERSONALI, OPPORTUNITÀ, OBIETTIVI E STRUTTURA DEI CONTENUTI**

In questo primo capitolo vengono indicate le basi che definiscono il contesto della ricerca realizzata, iniziando con una breve introduzione del tema trattato in questa tesi e delle motivazioni personali per cui è stato scelto questo tema. Sarà anche presentato il contesto accademico nel quale si inserisce questa tesi, così come le implicazioni relative al quadro istituzionale.

Infine, saranno presentati gli obiettivi pianificati all'inizio della investigazione e il modo in cui si strutturano i contenuti della tesi esposta qui di seguito.

## 1.1. MOTIVAZIONI PERSONALI

L'industria mineraria e tutto ciò che la circonda è un argomento che da sempre mi è sembrato affascinante. Non invano la località dove sono cresciuto e abito ancora oggi, Monreal del Campo, si trova a meno di 20 minuti dalle miniere di ferro di Sierra Menera, nel comune di Ojos Negros. Non sono nemmeno lontani i bacini ligniferi di Utrillas-Aliaga. In entrambe le zone, che un tempo sono state aree dinamiche nel contesto territoriale della provincia di Teruel, la cessazione dell'attività ha avuto un impatto profondo sul territorio, sulla popolazione e sullo stile di vita tradizionale dei suoi abitanti.

Sebbene la Compagnia Mineraria di Sierra Menera decise di terminare la sua attività e avviasse un piano di licenziamento nell'anno 1987 (Serrano González, 1995), pochi mesi dopo la mia nascita, nel corso degli anni ho avuto modo di constatare gli effetti che questa decisione ha significato per la località di Ojos Negros, la quale tra gli anni 1981 y 2001 ha perso quasi la metà della sua popolazione (IAEST, 2019), e in particolare per il quartiere minerario di Sierra Menera, praticamente abbandonato oggi. Parte dei lavoratori minerari sono stati trasferiti in PYRSA (Piezas y Rodajes S.A.) inaugurata nell'anno 1990 in Monreal del Campo come parte del processo di riconversione e di smantellamento delle miniere (Pérez Boned, 2015). In questo modo, la località ha tratto profitto indirettamente della decisione intrapresa da parte della compagnia mineraria.

Al contrario, nel corso degli ultimi anni ho potuto constatare di persona come l'apertura di un impianto di imbottigliamento di acqua minerale naturale nel comune di Bronchales (Aguas de Bronchales S.A.), località da cui proviene gran parte della mia famiglia e dove mi trovo adesso scrivendo questo testo, ha agito da stimolo positivo all'economia del comune attirando giovani famiglie con figli in età scolastica. L'inaugurazione di questa nuova attività economica ha permesso non solo frenare il processo di spopolamento che è cominciato negli anni 40 del secolo scorso, ma anche, nel anno 2017, e per la prima volta da molto tempo, i dati ufficiali sulla popolazione sono cresciuti.

Uno dei successi personali più soddisfacenti che derivano del processo di elaborazione della tesi qui presentata è stato comprendere più profondamente i fattori che si nascondono dietro i processi e situazioni reali appena descritti.

In questo modo, quando in una riunione con il Dott. Antonio Valero, direttore del CIRCE (Centro di Ricerca delle Risorse e del Consumo Energetico) e la mia relatrice di tesi, la Dott.ssa Ana Escalona, è stata suggerita la possibilità di sviluppare un inventario completo delle risorse minerali, energetiche e idriche di Aragón, ho accettato senza esitazione.

Accademicamente, già nell'ambito della mia formazione come geologo, ho avuto la possibilità di approfondire i processi di generazione dei depositi minerali, la distribuzione e le caratteristiche dei principali giacimenti presenti nella mia regione, Aragón, e dei grandi corpi mineralizzati mondiali e i principali metodi di estrazione delle risorse minerarie. Durante quel periodo, ho anche potuto imparare alcuni concetti sulla legislazione mineraria spagnola e sui mercati dove si vendono i prodotti minerali. Se l'attività mineraria è già di per sé una materia affascinante, tutti i processi coinvolti nella formazione ed estrazione dei combustibili fossili non lo sono meno. Così, durante la mia permanenza a Bologna per il programma Erasmus nella mia Laurea in Geologia, ho avuto l'opportunità di seguire il corso di Geologia del Petrolio, tenuta dai professori Antonellini y Casolini. Nonostante a quell'epoca il *fracking*, che come potrà essere verificato nei seguenti capitoli è un tema centrale di questa tesi, avesse appena cominciato a utilizzarsi come una tecnica di estrazione degli idrocarburi, senza nemmeno sospettarsi la sua importanza nel futuro.

Fortunatamente, i molteplici fattori che compongono la realtà delle attività estrattive, al di là dal meramente geologico, hanno reso possibile l'inserimento del tema scelto con il principale ambito di ricerca e docenza della Dott.ssa Escalona, cioè la Geografia Economica ed Umana, così come con il Programma di Dottorato in Pianificazione Territoriale e Ambientale, il quale stabilisce il contesto accademico di questa tesi.

È evidente che l'attività mineraria è molto di più della semplice estrazione di una risorsa per fini economici. Gli importanti impatti derivati degli sfruttamenti minerari suscitano un forte rifiuto nella società civile, così che sono state stabilite forti limitazioni al loro sviluppo in diversi luoghi, o addirittura vietati del tutto. Non sono meno importanti gli effetti sulla popolazione. Da una parte, possono essere una grande fonte di lavoro e di rivitalizzazione degli spazi rurali depressi, ma dall'altra, hanno la capacità di modificare profondamente le

attività che si sviluppavano prima nel territorio, così come di alterare le forme di vita tradizionali.

Per tutti questi fattori si è ritenuto cruciale andare oltre l'elaborazione di un semplice inventario delle risorse presenti nel territorio, tramite la generazione di un'analisi che studiasse come i fattori di cui sopra si combinano fra di loro in ognuno dei giacimenti presenti nella regione aragonese.

Nel'analisi proposta a tal fine, l'informazione spaziale svolge un ruolo fondamentale nella determinazione delle relazioni esistenti tra le risorse incorporate nell'inventario, il territorio e tutto quello che ivi si trova. In questo modo, l'utilizzo di Sistemi di Informazione Geografica (GIS) per l'acquisizione, registrazione, analisi, visualizzazione e presentazione con la suddetta informazione spaziale è stato enormemente importante in questo studio. Tale contributo è stato così grande da dedicargli un capitolo intero della tesi. Devo ammettere che la fase di esecuzione di questo analisi tramite l'utilizzo dei Sistemi di Informazione Geografica è stata la più interessante e soddisfacente di tutte.

La prima volta che ho lavorato con questo tipo di *software* è stato nell'ambito del Master Universitario in Pianificazione Territoriale e Ambientale, il quale garantisce l'accesso a questo programma di dottorato. Sebbene nel primo momento mi fosse potuto sembrare un po' complicate, sono riuscito a maneggiarlo presto e divertirmi lavorando con questa strumentazione informatica. Tanto che, poco dopo gli inizi di questa tesi, sempre sostenuto dalla mia relatrice, ho deciso di continuare a formarmi in questo campo e frequentare il Mater in Sistemi di Informazione Geografica di ESRI in Spagna, la società che sviluppa ArcGIS. Nella prospettiva del tempo, credo che questa decisione sia stata assolutamente corretta, visto che probabilmente molte delle analisi spaziali realizzate non avrebbero potuto essere fatte senza questa formazione in più.

Ad ogni modo, in tutti questi anni non solo ho continuato a formarmi nell'ambito dei Sistemi di Informazione Geografica, ma ho cercato di frequentare qualsiasi corso o conferenza che potesse essere interessante per l'elaborazione della tesi. Così, poco tempo dopo il mio inizio in questo programma di dottorato ho frequentato tramite l'Università a Distanza diversi corsi relativi alla Geografia Umana a fine di completare la mia formazione

come Laureato in Geologia. Uno di questi corsi mi ha appassionato più di tutti gli altri. Si tratta di Geopolitica, della quale avevo appena qualche nozione basica, ma che presto è diventata una grande passione. Così, quando quasi per caso ho scoperto il corso tenuto dal Colonnello del Esercito Pedro Baños, è denominato *Geopolitica delle risorse naturali*, non ho avuto nessun dubbio per seguirlo. La formazione ricevuta in questo corso è stata molto importante per lo sviluppo della tesi.

D'altra parte, tra i corsi frequentati, devo sottolineare in un modo speciale quello tenuto in forma straordinaria dal Dott. Antonio Valero e la Dott.ssa Alicia Valero, denominato *Energia, economia e sostenibilità*, il quale non solo mi ha aiutato nell'elaborazione della tesi, ma anche personalmente per scoprire un po' meglio il modo in cui funziona l'economia mondiale.

## 1.2. OPPORTUNITÀ

Questo paragrafo inizia con una breve introduzione sul tema trattato in questa tesi. Poi saranno spiegati i fattori che determinano il contesto accademico e istituzionale in cui è stato sviluppato questo progetto.

### 1.2.1. Introduzione alla tematica

Aragón ha una lunga tradizione nel settore dell'attività mineraria che comincia con i primi abitatori della regione, già nell'Età della Pietra, e arriva fino ai nostri giorni. Nell'occupazione romana della Penisola Iberica l'industria metallurgica dell'area del Moncayo raggiunse un grande prestigio. In quest'epoca è già iniziata l'estrazione di sale nelle miniere di Remolinos (Zaragoza). D'altro lato, gli elementi ornamentali del Palazzo della Aljafería di Zaragoza sono un magnifico retaggio dei lavori con gesso e alabastro dell'epoca della dominazione araba di Aragón. Da questi tempi datano le prime testimonianze dello sfruttamento del ferro nei dintorni di Sierra Menera (Ojos Negros, Teruel). Dall'Età Moderna datano, invece, diversi riferimenti dell'estrazione di metalli quali la galena, l'argento, il manganese, il rame o l'antimonio in diversi luoghi dalla regione.

Sebbene, la risorsa mineraria che probabilmente abbia segnato più profondamente la storia della regione, oltre che il ferro, il sale, il gesso e il l'alabastro, menzionati nel paragrafo

anteriore, sia il carbone. Ci sono notizie sullo sfruttamento di questa risorsa energetica nei bacini ligniferi turolensi di Utrillas-Aliaga e Oliete-Andorra-Estercuel già dalla seconda metà del XVIII secolo. Intorno al 1917 è cominciata l'estrazione mineraria industriale del carbone in Aragón (Rubio Navas, Corral Lledó, Alberruche del Campo, Marchán Sanz, y Pérez Cerdan, 2012), nei bacini turolensi e in quello di Mequinenza, la quale portò progresso alle comarche dove si estraeva questa risorsa.

Malgrado la perdita di importanza del settore minerario della lignite e dei minerali metallici negli ultimi decenni, l'industria mineraria impiegava nell'anno 2015 direttamente 1150 persone circa, addette fondamentalmente alla produzione e vendita di rocce industriali e prodotti di cava. In diverse comarche quali Andorra-Sierra de Arcos, Bajo Martín e le Cuencas Mineras (Teruel) o la Ribera Baja del Ebro (Zaragoza), il settore minerario assume ancora una percentuale importante dal valore aggiunto totale.

È opportuno sottolineare che il settore minerario presenta varie caratteristiche che fanno di esso un'attività economica molto diversa dal resto, quali il valore localizzato del prodotto e la sua temporalità. Entrambi saranno descritti nel secondo capitolo della tesi. Gli elementi minerali sono una risorsa limitata e geologicamente ristretta a quei luoghi dove è presente naturalmente, il che promuove la concorrenza tra le nazioni per l'accesso ed il controllo ai corpi mineralizzati. Inoltre, le risorse minerarie sono essenziali ai fini di un funzionamento efficiente delle società moderne. In certi casi la sua rilevanza economica è legata a dei rischi di approvvigionamento in futuro, ragione per la quale la Unione Europea ha catalogato come critiche determinate risorse minerali.

La regione europea è dipendente della importazione di queste materie prime e, in questo modo, le interruzioni nella fornitura per motivi economici, geopolitici o di altro tipo possono compromettere la competitività di certi settori industriali quali l'industria chimica, automobilistica, le telecomunicazioni..., minacciando il corretto funzionamento della economia.

Per questo motivo, l'Unione Europea, tramite la iniziativa *"Raw Materials –meeting our critical need for growth and jobs in Europe"*, ha fissato vari obiettivi in relazione con l'accesso alle risorse critiche non energetiche, sottolineando la necessità di promuovere

l'approvvigionamento sostenibile dalle fonti delle proprie nazioni della UE. Come parte del piano *“European Innovation Partnership’s Strategic Implementation Plan”*, l’Unione Europea è creato il servizio *European Raw Materials Knowledge Base (EURMKB)* il quale, grazie al contributo dei paesi europei, compilerà, memorizzerà, aggiornerà, analizzerà e diffonderà l’informazione sulle materie prime critiche esistenti nel territorio europeo.

Per incrementare l’approvvigionamento di questo tipo di risorse provenienti dai territori della propria Unione è necessaria un’adeguata pianificazione territoriale, il che conferisce alle sue regioni un ruolo fondamentale. In effetto, il capitolo *“Sviluppo del territorio sfruttando le loro caratteristiche”* della *“Il Agenda Regionale di Ricerca, Sviluppo e Trasferimento di Conoscenze di Aragón”*, si sottolinea l’idea dell’interazione tra popolazione e territorio così come l’insediamento di attività economiche e l’uso delle risorse (Martínez, Martínez, y Gavín, 2008). D’altra parte, l’attività mineraria è una delle questioni centrali recepite nella *Strategia di Pianificazione Territoriale di Aragón, nel paragrafo riferito alle Risorse Naturali* (Departamento de Política Territorial e Interior, 2014).

È pertanto essenziale per le regioni conoscere le risorse presenti nei propri territori per affrontare la Pianificazione Territoriale e le strategie future. Comunque, nell’attività mineraria non solo intervengono fattori geologici, dato che le ripercussioni sociali, economiche e ambientali sono fortemente rilevanti. In questo modo, prima di affrontare qualsiasi studio sull’attività mineraria è necessaria l’introduzione di variabili e indicatori che valutino gli aspetti sociodemografici, economici, geopolitici, geologici e ambientali legati all’avvio di una attività di questo tipo.

D'altra parte, una delle caratteristiche principali dell'industria mineraria è legata ai suoi impatti ambientali e sociali. Per questo motivo, e malgrado la sua importanza per l’economia ed il mantenimento della forma di vita attuale, l’attività estrattiva suscita una grande incomprendimento nell’opinione pubblica. In tal modo, negli ultimi decenni, le autorità e le imprese del settore hanno incentrato i suoi sforzi verso la ricerca d’una attività mineraria sostenibile, basata principalmente in tre pilastri: lo sviluppo economico, la protezione del medio ambiente ed il rispetto per l’essere umano. Per raggiungere questo scopo utilizzano

diversi strumenti quali le valutazioni di impatto ambientale e sociale e i piani di chiusura delle miniere, i quali cercano di promuovere la sostenibilità nella industria estrattiva.

In questa tesi si tratterà anche un altro tema relativo alla estrazione e lo sfruttamento delle risorse geologici. Concretamente, ci riferiamo agli idrocarburi e la sua possibile estrazione nella regione attraverso l'utilizzo della tecnica nominata fratturazione idraulica. Lo sviluppo di questa tecnica, detta anche *fracking*, è diventata negli ultimi anni un elemento chiave nello scenario geopolitico mondiale (Capitolo II), e ha apportato agli Stati Uniti consistenti vantaggi economici, industriali e geopolitici. Questa tecnica è basata nella liberazione degli idrocarburi contenuti in rocce a bassa permeabilità, attraverso la generazione e propagazione di fratture in questo strato roccioso, create dal pompaggio del liquido fratturante (acqua, sabbia e altri agenti chimici). I grandi impatti legati a questa tecnica hanno sollevato protesti tra i gruppi di ambientalisti in tutto il mondo.

Tutti questi temi saranno trattati ampiamente in questa tesi, particolarmente nel suo secondo capitolo, il quale si stabilisce come quadro bibliografico del lavoro sviluppato.

### 1.2.2. Contesto accademico

La tesi esposta qui di seguito è stata sviluppata nel quadro del Programma di Dottorato in Pianificazione Territoriale e Ambientale, del Dipartimento di Geografia e Pianificazione del Territorio dell'Università di Zaragoza. Come indicato sul sito web ad esso dedicato, il dipartimento ha maturato una tradizione consolidata da più di trent'anni nell'ambito della formazione di dottorandi. Dal 1995 questa formazione rientra nel suddetto programma.

Questo programma di dottorato fu riconosciuto per la sua eccellenza da parte del Ministero dell'Istruzione negli anni accademici 2011-12, 2012-13 e 2013-14. La versione attuale del programma rimane in attesa di tale valutazione.

Gli studi di dottorato del Dipartimento di Geografia dell'Università di Zaragoza presentano un elevato grado di interdisciplinarietà, sia per la diversa formazione accademica degli studenti, sia per la differente provenienza dei suoi docenti. Da questa interdisciplinarietà emergono numerose linee di ricerca collegate con la Pianificazione del Territorio ed ai con le problematiche ambientali.

A questo punto occorre menzionare che una parte del contenuto di questa tesi è stato sviluppato nell'ambito del progetto "Le risorse energetiche e lo sviluppo territoriale di Aragón. Analisi e proposte in un nuovo scenario globale", finanziato dall'Istituto Universitario di Investigazione in Scienze Ambientali di Aragón (IUCA). Questa istituzione appartiene all'Università di Zaragoza.

Il contenuto di questo progetto, svolto nel periodo tra gennaio 2015 e gennaio 2016, si inserisce nella linea di ricerca "Sfide globali e impatti locali" promossa dal Laboratorio per lo Sviluppo Territoriale (Grupo de Estudios de Desarrollo Territorial, GEDETUZ), al quale apparteneva uno dei direttori, la Dott.ssa Escalona. D'altra parte, il progetto è stato arricchito dal percorso investigativo del gruppo Ricostruzioni Paleoambientali (Reconstrucciones Paleoambientales), al quale appartiene l'altro direttore, il Dott. Aurell. In questo modo, è stato possibile unire l'esperienza di entrambi in un progetto interdisciplinare.

Gli obiettivi del progetto sviluppato derivano dalla necessità di argomentare in maniera appropriata lo studio sul presente e sul futuro delle risorse energetiche della Comunità Autonoma di Aragón. A tal fine si sono dovuti analizzare aspetti quali l'utilizzo efficiente e sostenibile delle risorse ed il suo impatto sullo sviluppo territoriale, specificamente nelle aree di produzione.

Più nel dettaglio, uno degli obiettivi concreti di questo progetto è stata la generazione di un inventario aggiornato e di una diagnosi delle risorse energetiche di Aragón, attraverso la valutazione del loro potenziale minerario. D'altra parte, si è ritenuta necessaria l'acquisizione di elementi per l'elaborazione di proposte volte allo sfruttamento efficiente, sostenibile ed equilibrato di queste risorse.

Il lavoro sviluppato si è focalizzato sullo studio di due tipi fondamentali di risorse energetiche: la lignite procedente della Formazione Escucha nei bacini minerari di Teruel e delle unità geologiche del Terziario nella Depressione dell'Ebro, e gli idrocarburi. Per questi ultimi è stato analizzato il potenziale di determinate unità geologiche affioranti nel territorio aragonese per l'analisi del loro potenziale come rocce generatrici di idrocarburi.

D'altra parte, e inserite dentro al programma Erasmus +, sono state realizzate delle pratiche dottorali nel Laboratorio di Analisi e Rappresentazione Territoriale e Urbane, LARTU, del Politecnico di Torino. Durante le cinque mesi intercorsi, oltre di migliorare diversi aspetti cartografici e tecnici dei contenuti della propria tesi dottorale, ebbi l'opportunità di lavorare, grazie alle Dott.sse Taddia e Bottero e al Dott. Lo Russo, nella elaborazione della mappa delle cave del Piemonte incluso nel Piano Regionale delle Attività Estrattive, PRAE.

### 1.2.3. Quadro istituzionale

Al di là del contesto accademico, descritto nel paragrafo precedente, è inserito all'interno del Programma di Dottorato in Pianificazione Territoriale e Ambientale, del Dipartimento di Geografia e Pianificazione del Territorio dell'Università di Zaragoza, il quadro istituzionale ha un peso assai significativo.

Grazie ai contatti avviati dal Dott. Antonio Valero, direttore del Centro di Ricerca delle Risorse e del Consumo Energetico (Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos, CRICE) con il Dipartimento Regionale dell'Industria e dell'Innovazione del Governo di Aragón, e dopo avere presentato il progetto a lavorare nella sede del governo, il 17 ottobre 2014 è stato firmato un accordo per lo sviluppo di attività di ricerca nel settore energetico e minerario di Aragón (iUNIZAR, 2014). Più in particolare i firmatari del suddetto accordo sono stati il Governo di Aragón, l'Università di Zaragoza e l'Associazione delle Aziende Estrattive di Aragón (AEMA).

Mediante questo accordo, che si è tradotto in diversi appuntamenti con i firmatari, con il Dipartimento Regionale dell'Industria e delle Miniere e con l'Ufficio della Promozione e lo Sviluppo Minerario del Governo di Aragón, è stato possibile accedere ad un quantitativo considerevole di documenti fondamentali per la realizzazione di questa tesi.

## 1.3. OBIETTIVI DELLA TESI

Il principale obiettivo della tesi riguarda la determinazione del potenziale minerario globale della Comunità Autonoma di Aragón attraverso la generazione di un inventario completo di tutti i depositi geologici e indizi della presenza di minerali presenti nella regione. I registri che compongono l'elenco, riferiti a miniere, cave, giacimenti o indizi minerali,

saranno valutati in base alle loro particolarità geologiche ed al valore strategico del prodotto sfruttabile, alla idoneità del terreno a sopportare gli impatti delle attività estrattive e al loro inserimento nel contesto geografico dove sono localizzati, tenendo conto degli aspetti sociali, economici e ambientali.

Il raggiungimento degli obiettivi fissati comporterà, in primo luogo, lo sviluppo di una base di dati di tipo geografico, cioè che associ un'informazione spaziale definita per una serie di coordinate ad un insieme di attributi. Questa base di dati di tipo geografico sarà costituita da gli sfruttamenti minerali e idrici, diritti minerali, giacimenti e indizi della presenza di risorse minerarie presenti nella C.A. di Aragón. In altri termini, sarà posto in atto un inventario completo dei luoghi in cui si trovano, si sono trovate o si potrebbero trovare risorse minerarie ed energetiche nella regione.

Inoltre, saranno raccolte tutte le informazioni necessarie per valutare lo sfruttamento di queste risorse in maniera sostenibile e rispettosa della natura della popolazione. Inoltre, questo strumento permetterà di comprendere come possano essere inserite le attuali strategie della pianificazione territoriale come contributo allo sviluppo aragonese e, in particolare, a quello delle aree produttive. A tal fine saranno creati una serie di indicatori per la valutazione delle risorse inventariate e dei luoghi in cui si trovano, in tre dimensioni fondamentali delle attività estrattive: *geologica*, *socioeconomica* e *ambientale*.

La prima di queste dimensioni analizza le caratteristiche geologiche del corpo mineralizzato o della falda acquifera che alimenta gli sfruttamenti di giacimenti acquiferi, nonché il valore strategico delle risorse oggetto di studio. Nel caso degli idrocarburi non convenzionali questa dimensione valuterà il potenziale come rocce generatrici di idrocarburi di alcune formazioni geologiche presenti nella Comunità. Gli indicatori che compongono questa dimensione rispondono ad una questione fondamentale della fase esplorativa, se il giacimento presenta un interesse economico e strategico sufficiente a considerarli sfruttabili. Tuttavia, è importante notare che questa analisi è una semplificazione che permette di comparare fra di loro i registri che compongono la base di dati creata, in quanto gli studi di viabilità realizzati dalle società minerarie sono complessi e specifici per ogni corpo mineralizzato. Queste analisi incorporano svariati fattori relativi alle caratteristiche del corpo

mineralizzato, tra i quali la valutazione delle riserve minerali, i metodi di sfruttamento, gli studi geotecnici, nonché gli studi di mercato e di economie di scala.

La dimensione nominata come *Caratteristiche del terreno* studia l' idoneità del territorio dove si localizza il giacimento a sopportare le perturbazioni dell' ambiente che derivano dalle attività estrattive, analizzando aspetti quali il potenziale di generazione e propagazione di drenaggio acido di miniera, la pendenza del terreno in prossimità del giacimento o la facilità delle falde acquifere per tornare a rieparsi. Entro questa dimensione sono stati inclusi i rischi geologici e climatici, non solo per gli eventuali danni alle macchine, alle infrastrutture ed ai lavoratori stessi, ma anche perché questi eventi potrebbero scatenare altre conseguenze ambientali catastrofiche, quali la rottura dei bacini di decantazione per terremoti, o le piogge torrenziali che hanno la capacità di liberare grandi quantitativi di materiali tossici nelle rete idrografiche. Per fortuna, esistono diverse alternative per evitare o minimizzare gli impatti dell'attività estrattiva sull'ambiente e per correggere gli effetti negativi generati quando l' impatto non sia evitabile.

La terza dimensione utilizzata nell'analisi dei registri inclusi nella base di dati, denominata *Inserimento socioeconomico*, analizza elementi relativi all' integrazione dello sfruttamento minerario con la popolazione locale dove si trovano i giacimenti, sia direttamente come a i suoi interessi (economici, ambientali, estetici, affettivi, etc.). L'obiettivo è determinare se la possibile attività estrattiva legata allo sfruttamento delle risorse comporterà un risparmio maggiore che gli impatti generati nell'ambiente naturale e umano.

Per altro, con la finalità di diffondere l'informazione raccolta nella base di dati de di poter divulgare in un modo visuale e interattivo i risultati ottenuti nell'analisi, sarà generata una piattaforma di consultazione dei dati tramite un' applicazione web di tipo geografico. I dati incorporati nell' applicazione mostreranno l'informazione relativa alle caratteristiche e ai risultati dell'analisi. Sarà anche mostrata la loro disposizione spaziale sul territorio aragonese.

Uno degli obiettivi principali della tesi consiste nell'elaborazione di un pacchetto di strumenti di *geoprocessing* che permetta di trasferire la metodologia di analisi impiegata ad altri contesti territoriali, in maniera darisparmiare una quantità di tempo considerevole nel

processo. In questo modo, utilizzando come dati di partenza le risorse presenti in altri contesti territoriali e sostituendo l'informazione cartografica ausiliare relativa alla Comunità Autonoma di Aragón con quella del nuovo territorio analizzato, i tools generati automatizzeranno i processi di analisi spaziali e i calcoli matematici fino a ottenere i risultati finali.

In sintesi, gli obiettivi proposti inizialmente sono i seguenti:

1. Stabilire una tipologia e una diagnosi aggiornata delle risorse minerarie, energetiche e idriche di Aragón, rivolgendo particolare attenzione a quelle catalogate come critiche dalla UE.
2. Analizzare e valutare il potenziale sfruttamento di queste risorse e l'impatto territoriale prevedibile nell'ipotesi di avviamento di una attività mineraria ad esse legata.
3. Generare il pacchetto di strumenti adeguato per la traslazione della metodologia di analisi proposta ad altri territori, minimizzando i tempi di lavoro, e creare una piattaforma di visualizzazione che permetta diffondere i risultati del lavoro.

D'altra parte, si fa notare che parte del lavoro sviluppato in questa tesi è stato finanziato dall'Istituto Universitario di Investigazione in Scienze Ambientali di Aragón (IUCA) della Università di Zaragoza, attraverso il progetto "Le risorse energetiche e lo sviluppo territoriale di Aragón. Analisi e proposte in un nuovo scenario globale." L'obiettivo principale di questo progetto che, come indica il proprio nome è incentrato sullo studio delle risorse energetiche esistenti nella Comunità Autonoma di Aragón, è rivolto all'analisi del potenziale generatore di idrocarburi di alcune formazioni geologiche che affiorano nella regione. Concretamente, queste sono diverse unità geologiche del Carbonifero depositate in bacini marini che affiorano ampiamente nel anticlinale di Montalbán, e altre formazioni geologiche ricche in materia organica di età giurassica.

Per il compimento di questo obiettivo, sono stati selezionati diversi affioramenti di queste formazioni rocciose al fine di elaborare il prelievo di campioni rocciosi per l'analisi del contenuto in carbonio organico (TOC), parametro fondamentale per determinare la loro

qualità come rocce generatrici di idrocarburi. I risultati di questo analisi saranno inclusi nella base di dati nel gruppo delle risorse energetiche.

#### 1.4. STRUTTURA DEI CONTENUTI

I contenuti di questa tesi sono strutturati in sette capitoli principali, ai quali saranno aggiunti tre appendici addizionali. Ogni capitolo presenta tutta una serie di aspetti diversi relativi ai lavori sviluppati in questo progetto, cominciando dalla rassegna bibliografica preliminare fino alla esposizione dei risultati e le conclusioni ottenute in questo studio.

Di seguito saranno esposti sistematicamente i capitoli che compongono la tesi, i titoli assegnati, così come una breve descrizione dei contenuti di ognuno di loro:

In questo primo capitolo (**Capitolo I**), intitolato *Introduzione. Motivazioni personali, opportunità, obiettivi e struttura dei contenuti* sono inseriti elementi quali la scelta della tematica da affrontare, gli antecedenti, il contesto accademico-scientifico e istituzionale, gli obiettivi della tesi e la struttura dei contenuti.

Nel **Capitolo II**, *Interesse della questione: le dimensioni chiave della sostenibilità nell'industria mineraria e la sua analisi in un contesto di concorrenza globale*, si rispecchiano i principali concetti teorici relativi all'attività mineraria e alla frattura idraulica, così come ai suoi impatti, allo sviluppo sostenibile e alla concorrenza globale per l'accesso alle risorse. Questi concetti vengono impiegati come criteri nell'analisi del potenziale minerario delle risorse minerali, energetiche e idrologiche della Comunità Autonoma di Aragón.

Il **Capitolo III**, *Elementi e ambito di studio*, contestualizza il lavoro sviluppato in due aspetti fondamentali. Da un lato, viene descritta la metodologia utilizzata nell'acquisizione dell'informazione necessaria per lo sviluppo della base di dati, così come le risorse in essa contenute differenziate secondo la tipologia propria. Nella descrizione di queste risorse si analizzano aspetti come la loro abbondanza relativa e la distribuzione nel territorio aragonese. Con particolare attenzione sono descritte le materie prime catalogate come critiche dalla Commissione Europea, così come le formazioni geologiche con potenziale di generazione di idrocarburi. Dall'altra parte, in questo capitolo si fa una contestualizzazione del territorio dove si trovano le risorse appena descritte, sottolineando quei fattori utilizzati

nella risoluzione degli indicatori che compongono ogni dimensione dell'analisi effettuata in questa tesi.

Il **Capitolo IV**, *La geobase di dati. Disegno dell'analisi multifattoriale, possibilità e criteri di gestione degli indicatori*, introduce la descrizione della metodologia usata nell'esecuzione dell'analisi di interesse minerario. Incorpora una spiegazione degli indicatori impiegati nella risoluzione di ognuna delle tre dimensioni fondamentali proposte: *Profilo geologico, Caratteristiche del terreno e Inserimento socioeconomico*.

Nel **Capitolo V**, *Strumenti per la generazione, analisi e presentazione della base di dati*, viene descritta l'importanza dell'uso dei Sistemi d'Informazione Geografica nelle analisi spaziali in generale, e in questa tesi in particolare. In questo modo, si descrivono i trattamenti necessari per l'utilizzazione dell'informazione cartografica ausiliare nella risoluzione degli indicatori o la generazione delle mappe che accompagnano questa tesi. Ugualmente, in questo capitolo rientra il processo di creazione di una piattaforma per la visualizzazione delle informazioni elaborate e dei risultati della tesi, così come la generazione di un sistema adeguato per la esportazione della metodologia a altri contesti geografici.

Nel **Capitolo VI**, *Diagnosi delle risorse minerali, energetiche e idrologiche di Aragón nel contesto della sostenibilità e della concorrenza globale*, si descrivono i risultati ottenuti per i registri contenuti nella base di dati e valutati nell'analisi di interesse minerario. Con particolare attenzione sono descritti i risultati ottenuti per le materie prime catalogate come critiche dalla Commissione Europea, così come per le formazioni geologiche affioranti nella regione con potenziale di generazione di idrocarburi.

Il **Capitolo VII**, *Ricapitolazione finale*, valuta il compimento degli obiettivi pianificati all'inizio della tesi, analizzando la metodologia utilizzata e i risultati ottenuti. Saranno anche incluse diverse azioni stabilite come linee di attuazione una volta finita la tesi. Inoltre si apporteranno, alcune brevi considerazioni finali sul lavoro realizzato.

Per quanto riguarda gli appendici:

L'**Appendice I**, denominato *Cartografia sistematica degli indicatori spaziali dell'analisi per una valutazione del interesse di estrazione delle risorse minerarie di Aragón*, presenta una

serie di mappe in cui si mostra il comportamento del territorio nel caso si iniziasse un'attività estrattiva, secondo i criteri stabiliti nell'analisi di interesse minerario.

Nell'**Appendice II**, *Costruzione ed esempi di utilizzo della piattaforma di visualizzazione*, si racconta il processo di creazione della piattaforma di visualizzazione dell'informazione contenuta nella base di dati relativa alle risorse minerali, energetiche e idrologiche di Aragón, così come dei risultati ottenuti nell'analisi di interesse minerario proposto. Inoltre, in questa appendice saranno incluse le caratteristiche dei widget incorporati, i quali conferiscono una maggiore capacità di interazione all'applicazione creata.

Infine, l'**Appendice III** include l'"Accordo di collaborazione tra il Governo di Aragón, l'Università di Zaragoza e l'Associazione delle Aziende Estrattive di Aragón (AEMA) per lo sviluppo di attività di ricerca nel settore energetico e minerario di Aragón" (*"Convenio de colaboración entre el Gobierno de Aragón, la Universidad de Zaragoza y la Agrupación de Empresas Mineras de Aragón (AEMA) para el desarrollo de actividades investigadoras en el sector energético y minero de Aragón."*).

## 1.5. RINGRAZIAMENTI

Voglio prendere questo momento per esprimere i miei ringraziamenti a tutte quelle persone che, in un modo o nell'altro, mi hanno aiutato in tutti quest'anni di lavoro. Senza di loro, tutto questo non sarebbe stato possibile.

Al Dott. Valero, per aiutarmi a ricondurre il tema della tesi verso una materia così interessante e con tante possibilità come l'attività mineraria, così come per costruire ponti e avviare il dialogo con i responsabili politici del Governo di Aragón. Alla Dott.ssa Alicia Valero per la sua instancabile ricerca di progetti in cui inserire il lavoro sviluppato in questa tesi.

Ai membri della Commissione di Controllo dell'Accordo di Collaborazione tra il Governo di Aragón, l'Università di Zaragoza e l'Associazione delle Aziende Estrattive di Aragón (AEMA), per l'aiuto documentale e per ascoltare con attenzione tutte le idee proposte. In particolare voglio mostrare la mia gratitudine a Rita Martínez, Responsabile dell'assistenza a imprese presso ANEFA (Associazione Nazionale degli Impresari Fabbricanti di Aggregati), per avermi

fatto arrivare i quaderni del Piano Strategico 2012-2025 nel Settore degli Aggregati, i quali ho studiato con attenzione.

A Jaume Sirvent, Direttore dell'Ufficio per la Promozione e lo Sviluppo Minerario, e a José Ignacio Urbizu, Direttore della Sezione di Studi e Piani Geominerari del Governo di Aragón, per il supporto documentale, per la sua attenzione nelle diverse riunioni e per le idee fornite per la migliore della informazione contenuta nella base di dati e per il perfezionamento dei criteri utilizzati nell'analisi del potenziale minerario delle risorse aragonesi.

Ai membri dall'Istituto Universitario di Investigazione in Scienze Ambientali di Aragón per avermi dato la possibilità di lavorare in un progetto così interessante. Al Dott. Marcos Aurell, codirettore di questo progetto, per il suo interesse e aiuto sia nel corso che al termine di esso.

A tutti i professori con cui ho avuto il piacere di condividere gli anni di formazione nel Dipartimento di Geologia. Ai professori del Master in Pianificazione Territoriale e Ambientale, in particolare alla Dott.ssa Paloma Ibarra, relatrice del mio Progetto Finale, di cui conservo un grato ricordo. Alla Dott.ssa Maite Echeverría, per l'interesse mostrato nel mio lavoro dal momento in cui ho cominciato in questo programma dottorale.

Ai professori del Master in Sistemi d'Informazione Geografica, Laura Razola e Carlos Henche, per il suo aiuto nell'elaborazione della prima versione della piattaforma di diffusione, visualizzazione e consulta dei risultati ottenuti in questo lavoro.

A tutti i membri del Gruppo di Studi Minerari e Ambientali, il quale riunisce a un magnifico gruppo di geologi spagnoli e cileni specializzati nello studio degli impatti ambientali legati all'attività mineraria, per l'elevata qualità delle sue pubblicazioni. Senza di loro, l'analisi effettuato non sarebbe stato così completo. In particolare, desidero ringraziare ai Dott.ri Pablo Higuera e Javier Lillo per la sua disponibilità per far parte della Commissione di tesi.

Al Dott. Lorenzo Reyes per l'interesse mostrato nella realizzazione del rapporto su questa tesi come dottore esperto nella materia proveniente d'una istituzione straniera.

Al Dott. Marco Santangelo per avviare le procedure perché io potessi realizzare queste pratiche nel Politecnico di Torino. Al Dott. Lo Russo, il mio coordinatore in quel periodo, e alle Dott.sse Marta Bottero e Glenda Taddia, per offrirmi la possibilità di collaborare con loro in un progetto così bello. Il mio ringraziamento speciale alla Dott.ssa Taddia, per tutti i documenti e rapporti riempiti per causa mia. Grazie di tutto, Glenda.

Ad Antonio Cittadino, direttore del Lartu, centro nel quale ho realizzato queste pratiche dottorali, e a tutti i tecnici del laboratorio.

Al Programma CAI-Ibercaja per Soggiorni di Ricerca, per finanziare una parte di questo tirocinio.

A Panos, il mio coinquilino durante quei mesi, e a i miei colleghi di laboratorio, per farmi scoprire quella magnifica città. A Francesco, per offrirmi la sua amicizia dal momento nel quale sono arrivato al laboratorio e per il suo aiuto con la lingua italiana.

A María, Irene, Vidal, Jagoba, María José, Anru, Ramón, Patry, Raquel, Andrea, Laura, Ruth, Menchu... e tante altre persone che in un modo o nell'altro mi hanno sostenuto e mi hanno accompagnato nel corso del processo. Ad Angela per il suo costante appoggio e incoraggiamento, e per il suo inestimabile aiuto con i testi in italiano.

Alla mia famiglia. Alla mia sorella Sandra e al mio fratello Eduardo. Al mio piccolo nipote, perché un giorno capirà perché ero sempre al computer, invece di giocare con lui.

Al mio zio Juan Pero, che mi manca tanto, per la sua compagnia tutti quest'anni e perché so che sarebbe fiero di me.

A la mia relatrice di tesi e guida in questo percorso, la Dott.ssa Ana Escalona, per le sue idee, il suo sforzo e il suo interesse, che sono stati fondamentali. Per la sua pazienza e comprensione nei momenti difficili.

*Grazie a mia madre, per TUTTO.*

## Capítulo II: Interés de la cuestión: las dimensiones clave de una minería sostenible y de su análisis en un contexto de competencia global

2.1. Características generales de la comunidad autónoma de aragón

2.2. Minería: características y peculiaridades

2.3. La minería sostenible. problemática y debate

2.4. Desafíos de la competencia global por el acceso a los recursos mineros

2.5. Implicaciones metodológicas de la tesis

## INTERÉS DE LA CUESTIÓN: LAS DIMENSIONES CLAVE DE UNA MINERÍA SOSTENIBLE Y DE SU ANÁLISIS EN UN CONTEXTO DE COMPETENCIA GLOBAL

Una parte fundamental de la tesis presentada se corresponde con el diagnóstico de los recursos minerales, energéticos y aguas de la Comunidad Autónoma de Aragón, en un contexto de sostenibilidad y competencia global. Parece oportuno justificar la selección de ambos factores exponiendo cómo se recogen en la literatura académica e identificando qué aspectos merecen ser tenidos en cuenta en el análisis multicriterio propuesto y de qué modo.

La minería, incluyendo la extracción de hidrocarburos, es un tema complejo y que alimenta intensos debates sociales. Las labores mineras presentan, por un lado, una serie de características propias que hacen de ellas actividades industriales únicas. Por otro lado, los impactos ambientales derivados de este tipo de actividad son muy numerosos, si bien ofrecen riqueza y posibilidades de desarrollo en el entorno de los lugares donde se llevan a cabo.

En las últimas décadas, empresas y autoridades han trabajado para incorporar los preceptos del desarrollo sostenible a las labores extractivas, acuñando el término de *minería sostenible*. Este nuevo paradigma de minería se sustenta en tres pilares fundamentales: el desarrollo económico, la protección del medio ambiente y el respeto por el ser humano. Este último incluye a los trabajadores y a las comunidades locales. La obligatoriedad de presentar evaluaciones de impacto ambiental y social y planes de cierre de mina específicos antes de iniciar los proyectos mineros persiguen fomentar la sostenibilidad en las labores extractivas.

Por otro lado, la importancia de los productos mineros para la industria, la economía y la seguridad de las naciones, sumado al hecho de que los yacimientos minerales son escasos y se localizan en lugares concretos, ha fomentado la competencia entre los estados por el acceso y el control a los cuerpos mineralizados, bien sea de forma directa o indirecta. Ante esta situación los países elaboran listas de recursos críticos y estratégicos para su

supervivencia, dirigiendo sus políticas exteriores a la consecución de acuerdos comerciales que garanticen su suministro. La fractura hidráulica, o *fracking*, se ha convertido recientemente en una pieza clave del entramado geopolítico mundial. En Estados Unidos, único país donde esta técnica de producción de hidrocarburos se ha desarrollado con éxito a gran escala, su implantación ha otorgado al país norteamericano importantes ventajas económicas, industriales y geopolíticas. Sin embargo, los impactos ambientales y sociales derivados de la aplicación de esta técnica han provocado airadas protestas de los grupos ambientalistas, incluso fuera de los Estados Unidos.

Finalmente, en este capítulo se analizará cómo los conceptos bibliográficos incorporados han condicionado la elaboración del análisis de interés minero de los yacimientos e indicios minerales de la Comunidad Autónoma de Aragón.

## 2.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA COMUNIDAD AUTÓNOMA DE ARAGÓN

Antes de abordar la revisión bibliográfica que plasmará los conceptos teóricos fundamentales para el desarrollo de la tesis, referentes a la actividad minera, los impactos derivados de ella y los métodos de mitigación encaminados a alcanzar la sostenibilidad en el desarrollo de la actividad, así como de analizar el papel que juega este sector económico en el puzle geopolítico global, conviene contextualizar el marco de estudio, aportando unas breves pinceladas referentes al territorio aragonés, a la historia minera de la región y al estado de esta actividad económica en el momento actual.

### 2.1.1. Características geográficas

Aragón es una Comunidad Autónoma española localizada en el noroeste de la Península Ibérica. Su superficie es de 47.719 km<sup>2</sup>, dividida en tres provincias. De ellas, Zaragoza es la más extensa con más de 17.000 km<sup>2</sup>. Carece de salida al mar y limita al norte con las regiones francesas de Nueva Aquitania y Occitania, al oeste con la Comunidad Foral de Navarra, La Rioja, Castilla y León y Castilla-La Mancha y por el este con la Comunidad Valenciana y Cataluña. Parte de la región, incluyendo su capital, Zaragoza, se encuentra ubicada en la intersección de dos de los corredores más importantes del país. Por un lado, el valle del río Jalón y, especialmente la depresión del Ebro, forman parte del paso que une las dos ciudades más pobladas del país, Madrid y Barcelona. Por otro, el corredor entre dos de los principales puertos, Bilbao y Valencia, y que une el Cantábrico con el Mediterráneo, también discurre por la región aragonesa.

Según el Padrón Municipal de Habitantes elaborado por el Instituto Aragonés de Estadística (IAEST), la población aragonesa en 2018 era, exactamente, de 1.308.728 habitantes, de los cuales casi 955.000 residían en la provincia de Zaragoza, más de 219.000 en la de Huesca y alrededor de 135.000 en la de Teruel.

Más allá de los aspectos demográficos y del análisis de la distribución de la población en el territorio aragonés, que serán tratados en el Capítulo III de la tesis, es interesante estudiar la organización político-administrativa del territorio (Figura 2.1.). La unidad básica de esta organización es el municipio, que puede estar compuesto por uno o por varios núcleos de

población. El territorio aragonés se divide en un total de 731 municipios de tamaños muy dispares, puesto que su actual delimitación ha sido conformada por diversos factores históricos y geográficos («Atlas de Aragón», s. f.). Municipios como Caspe, Sabiñánigo, Ejea de los Caballeros y Zaragoza superan los 500 km<sup>2</sup>, mientras que 38 municipios no superan los 10 km<sup>2</sup>.

En Aragón, los municipios se agrupan en entidades intermedias, inferiores a la provincia, y que reciben el nombre de comarcas. Dichas entidades serán apeladas numerosas veces a lo largo de esta tesis, más como un objeto geográfico útil para la descripción de las variables y los resultados que como un elemento administrativo relevante a los efectos del presente trabajo. En la actualidad, los municipios aragoneses se agrupan en 33 comarcas, de extensión muy variable. Las comarcas de las Cinco Villas (2968 km<sup>2</sup>), en Zaragoza, la Comunidad de Teruel (2780 km<sup>2</sup>) y la Hoya de Huesca (2576 km<sup>2</sup>) son las más extensas de la región. Por el contrario, existen 13 comarcas que no superan los 1000 km<sup>2</sup>, siendo las más pequeñas las de Tarazona y El Moncayo y la Ribera Alta del Ebro, ambas en Zaragoza. Los límites comarcales no siempre coinciden con los provinciales. En las comarcas situadas en la frontera entre las provincias de Zaragoza y Huesca existen numerosos municipios pertenecientes a la primera englobados en comarcas en las que la gran mayoría de los municipios son oscenses.



Figura 2.1. Mapa político de Aragón. Elaboración propia.

### 2.1.2. Historia minera del territorio aragonés

Aragón cuenta con una larga tradición minera, que se inicia con el aprovechamiento de los recursos minerales y líticos por parte de los primeros pobladores del territorio durante la Edad de Piedra, y que se extiende hasta nuestros días. En el *Libro Blanco de la Minería en Aragón* (Rubio Navas et al., 2012) y en la obra titulada *La Minería de Aragón* (1994) se incorporan sendos capítulos dedicados al análisis de esta actividad económica a lo largo de las diferentes etapas históricas vividas por el territorio que hoy conocemos como Aragón.

La presencia de numerosas pinturas rupestres en abrigos localizados en las tres provincias aragonesas atestigua el aprovechamiento de recursos minerales para la elaboración de diversos tipos de pigmentos. También son numerosos los hallazgos arqueológicos relativos a útiles elaborados con materiales litológicos: objetos cortantes, punzones, puntas de flecha, lanza y hacha, abalorios, ornamentos realizados con metales preciosos y arcillas cocidas (Rubio Navas et al., 2012).

Por otro lado, diversos yacimientos localizados en el Bajo Aragón testifican la actividad ferro-metalúrgica de los pueblos prerromanos, así como el empleo de arcillas y arenas silíceas en la fabricación de cerámicas por parte de las culturas íberas.

Para algunos historiadores, la riqueza en recursos de Hispania y las políticas mineras romanas, basadas en la explotación preferente de los yacimientos localizados en las provincias frente a la de los recursos de la metrópoli, están detrás de la conquista de la península ibérica por esta civilización (*La Minería de Aragón*, 1994). Durante la ocupación romana del territorio aragonés la industria metalúrgica de Bilbilis (Calatayud) y Turiaso (Tarazona), que utilizaba hierro procedente de la zona del Moncayo, alcanzó un gran prestigio. También fueron construidas numerosas salinas, cuyos muros estaban edificados con piedra del entorno y su fondo revestido con areniscas, calizas y arcillas apisonadas. Además, se comenzó a extraer sal común de las minas de sal de Remolinos. Por otro lado, el hallazgo de monedas de oro y plata con señas distintivas de Caesaragusta (Zaragoza) y Osca (Huesca) hace pensar que estos metales procedían del entorno de dichas ciudades (Rubio Navas et al., 2012).

Los arcos, capiteles, ventanales y otros elementos decorativos localizados en el Palacio de la Aljafería de Zaragoza, son un magnífico ejemplo de los trabajos con yeso y alabastro realizados por la dinastía omeya durante la ocupación árabe de la Península Ibérica. Durante la edad media se hallan, asimismo, los primeros testimonios arqueológicos que indican el beneficio del mineral del hierro en el entorno de Sierra Menera (Ojos Negros, Teruel), así como otros indicios ligados a la forja de hierro en los valles pirenaicos, las faldas del Moncayo y la Sierra de Albarracín. En el *Libro Blanco de la Minería de Aragón* se hace referencia al aprovechamiento de aguas minerales-termales durante el dominio musulmán.

En el siglo XVI, ya en la Edad Moderna, vuelven a alcanzar cierto renombre las ferrerías del Moncayo y el Valle de Bielsa (Huesca), destinadas a la fabricación de armas y herramientas, debido a la excelente calidad del hierro producido. Existen también diversas referencias procedentes de esta época que describen la explotación de galena argentífera en Calcena (Zaragoza), de galena en Gistaín (Huesca), de manganeso en Crivillén y Camañas (Teruel), de cobre en Biel (Zaragoza) y Calamocha (Teruel), de antimonio en Moros (Zaragoza), de plata con antimonio en Torres de Albarracín (Teruel) o de yeso y alabastro en Quinto de Ebro (Zaragoza) (Rubio Navas et al., 2012).

A partir de la década de 1830, después de la Guerra de la Independencia, se produce una reactivación del sector minero en la región aragonesa, tras establecerse políticas arancelarias que beneficiaron, especialmente, al sector de la minería del hierro (Rubio Navas et al., 2012). Más tarde, en 1910, Salvador Calderón y Arana publica la obra *“Los minerales de España”*, con gran cantidad de información referente a las localizaciones de mineralizaciones y labores, a nivel regional y provincial. En esta obra se referencia el aprovechamiento de diferentes recursos en el territorio aragonés, como el carbón, el hierro, el cobalto o el azufre.

En las últimas décadas se ha producido el abandono sistemático de las explotaciones de metales de base y de minerales del hierro para la industria siderúrgica, así como de otros minerales como la barita, fluorita o azufre, aunque se mantiene activo el aprovechamiento de óxidos de hierro en determinadas áreas de la provincia de Zaragoza. Sin embargo, en los

últimos años el subsector más destacado dentro de la actividad minera, tanto en volumen de producción como en número de empleos, es el relacionado con los productos de cantera.

### 2.1.3. El sector minero aragonés en la actualidad

En 2016, el número de empleos relacionados con la actividad minería en Aragón suponía un 5,4% del total nacional en el sector. En ese mismo año, el valor de la producción minera aragonesa ascendía al 4% del global estatal, solo superado por la Comunidad de Madrid, Asturias, Comunidad Valenciana, Castilla y León, Galicia, Cataluña y Andalucía (Secretaría de Estado de Energía, 2016).

Por su parte, el Instituto Aragonés de Estadística (IAEST) ofrece algunos datos interesantes relativos al estado y evolución del sector minero en la región en el periodo comprendido entre 1994 y 2015, como el número de trabajadores empleados, la producción vendible del producto minero o las inversiones realizadas.

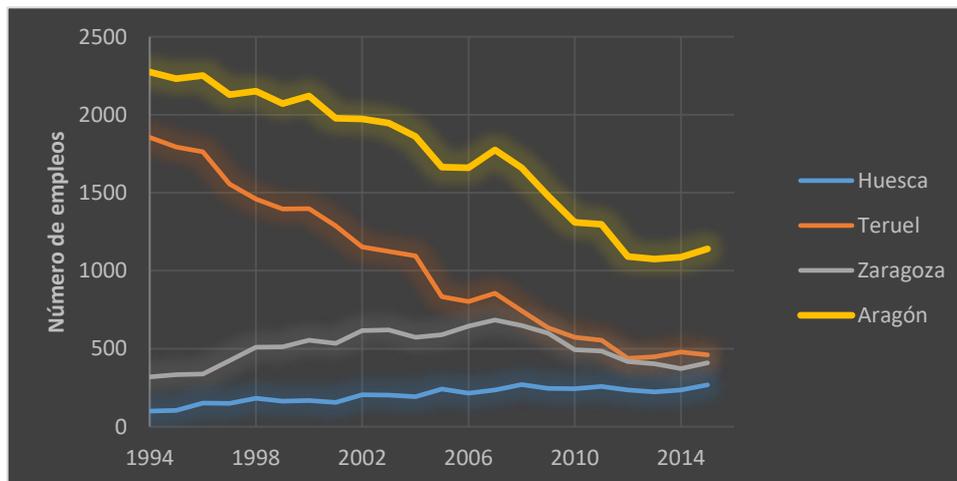


Figura 2.2. Número de empleos en el sector minero por provincia y a nivel regional. Elaboración propia a partir de los "Datos fundamentales del sector minero. Años 1994-2015" (IAEST, 2017).

En el año 2015, la minería empleaba de forma directa a 1140 trabajadores en las tres provincias aragonesas (IAEST, 2017), la mayoría en Teruel y Zaragoza. La Figura 2.2. muestra un importante declive en el número de empleos en el sector minero turolense, coincidente con el cierre de numerosas explotaciones de lignito. Los datos de esta provincia son determinantes en el descenso continuado observable para el periodo considerado a nivel

regional, a pesar de que las otras dos provincias aragonesas presentan un aumento relativo en el número de empleos en el sector.

En el periodo comprendido entre 2001 y 2007, anterior a la crisis económica, a pesar del progresivo descenso en el número de empleados, tanto la producción como las inversiones realizadas en el sector minero aragonés aumentaron de forma notable (Figura 2.3.), especialmente en la provincia de Zaragoza, donde la producción aumentó en un 42%, si bien Teruel es la que aporta una mayor proporción al total aragonés en ambos indicadores. Con el inicio de la crisis en 2008 se produce un fuerte retroceso tanto en la producción como en las inversiones en el sector minero, fundamentalmente por el decaimiento en la demanda de productos de cantera, tocando fondo en 2011. A partir de este año, puede observarse una recuperación progresiva del sector minero aragonés, en términos de producción, inversiones y número de empleos.

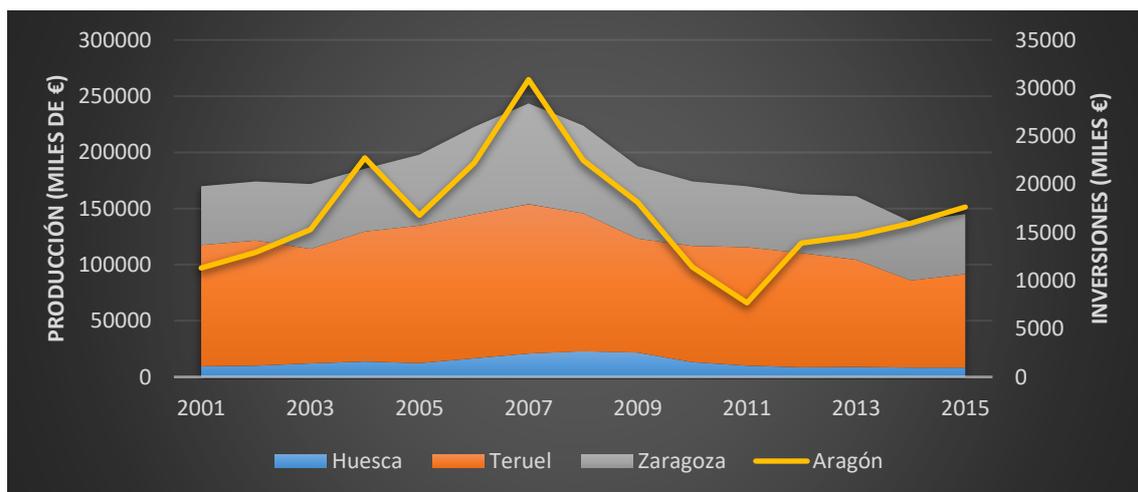


Figura 2.3. Producción vendible, en miles de €, de productos mineros por provincia e inversiones en el sector minero aragonés. Elaboración propia a partir de los "Datos fundamentales del sector minero. Años 1994-2015" (IAEST, 2017).

La minería aporta un valor añadido a las regiones donde se realiza. Dentro del contexto aragonés, es en la Delimitación Comarcal de Zaragoza donde el valor añadido de las actividades ligadas a las labores extractivas, energéticas y de gestión de aguas es más alto, con mucha diferencia sobre el resto, si bien en términos relativos solo aporta un 2,5% al total comarcal (Figura 2.4.). Por el contrario, estas actividades suponen un porcentaje

elevado del valor añadido total en las comarcas de Andorra-Sierra de Arcos (43,2%), la Ribera Baja del Ebro (38,8%), el Bajo Martín (29,9%) y en las Cuencas Mineras (15,8%).

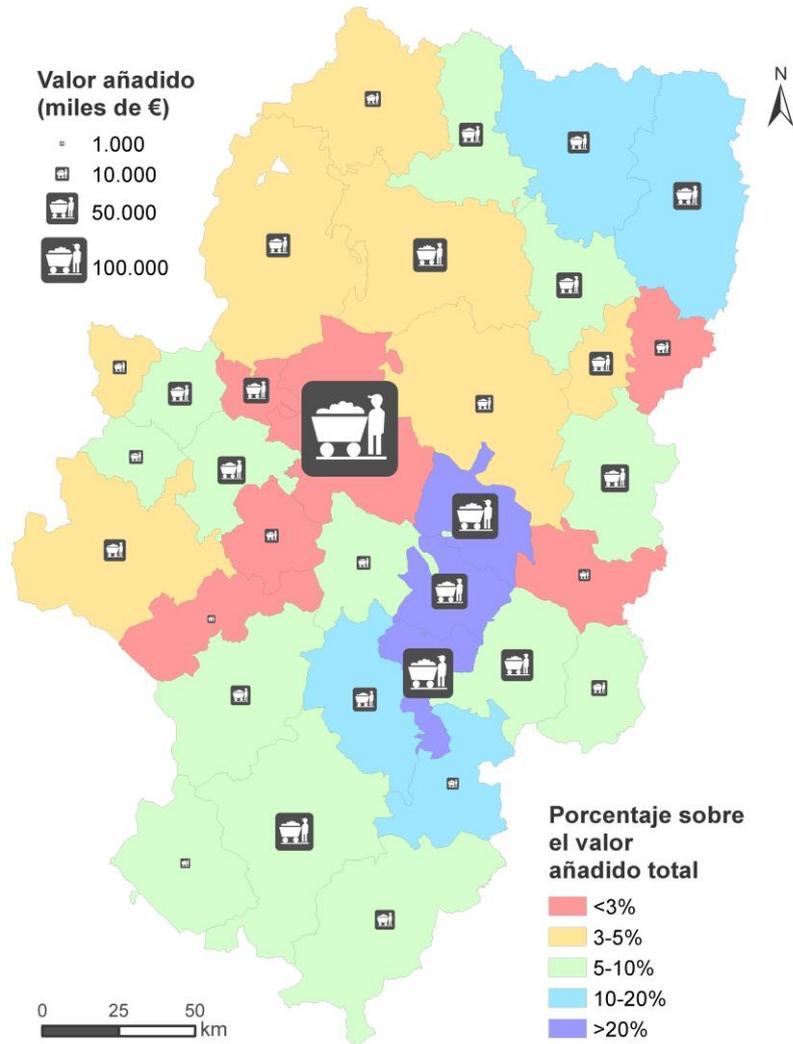


Figura 2.4. Valor añadido bruto de las actividades ligadas a la industria extractiva, la energía y las aguas (2016). Porcentaje relativo de estas actividades respecto al total comarcal. Elaboración propia a partir de datos del Instituto Aragonés de Estadística.

## 2.2. MINERÍA: CARACTERÍSTICAS Y PECULIARIDADES

Como podrá ser comprobado a lo largo de este capítulo, la minería es un tema controvertido, generador de intensos debates. Por un lado es necesaria para el mantenimiento del estilo de vida actual, pero a la vez causante de importantes recelos entre la población. El interés y la polémica que despierta la minería hacen que sea un asunto sobre el que han escrito muchos autores, siendo numerosos los libros, publicaciones, artículos, noticias y hasta blogs destinados a este tema.

Debido a la complejidad técnica del tema tratado son abundantes los manuales teóricos escritos por geólogos e ingenieros en los que disertan sobre las peculiaridades y características de la actividad minera. Gran parte de estos tratados analizan aspectos puramente geológicos, incluidos los procesos de formación de los recursos, los métodos de análisis y exploración de yacimientos minerales, etc. Otros manuales se centran en la explotación de estos recursos, bien siguiendo la línea geológica de los tratados descritos anteriormente, o bien introduciendo parámetros técnicos propios de la ingeniería.

No obstante, la mayoría de los libros, publicaciones, artículos y noticias consultados en la elaboración de esta tesis se centran en el estudio de las interacciones creadas entre la minería, el medio ambiente y el ser humano, incidiendo en los impactos que este tipo de actividades generan en los diversos compartimentos del medio. Muchos de ellos, especialmente en el caso de los artículos científicos, analizan las afecciones de la minería al medio centrándose en impactos concretos (deforestación, drenaje ácido de mina, afecciones a la población local...), localizados en áreas geográficas específicas. Por su parte, los manuales que estudian los efectos de la minería en el medio natural y social de forma conjunta, suelen ser de corte más teórico, incluyendo ejemplos concretos procedentes de diferentes contextos geográficos que reafirmen los datos presentados.

Por otra parte, existen varias guías dedicadas a la realización de evaluaciones de Impacto Ambiental, orientadas a la integración de los conceptos del desarrollo sostenible (que serán tratados en apartados posteriores) en los proyectos mineros. Ejemplo de ello son la guía de Evaluación e Intercambio de Buenas Prácticas para el Acceso Sostenible de Materiales Críticos en la UE (Comisión Europea, 2014b), o la Guía para Evaluar EIAs de Proyectos

Mineros de la Environmental Law Alliance Worldwide (2010). En estas publicaciones se detallan todos los elementos ambientales y sociales que podrían verse afectados por una explotación minera, analizando la mejor forma de protegerlos.

En esta tesis se conjugan las características de los dos últimos tipos de publicaciones mencionados, es decir, se realiza un análisis sistemático de los impactos que las labores extractivas pueden causar en la en el territorio, en la naturaleza y en la sociedad, incorporando los principios del desarrollo sostenible y la problemática de la competencia global por el acceso a los recursos. Se diferencia de los tratados mencionados hasta el momento en la amplitud de la región de estudio, que no se limita a una mina o un conjunto de labores extractivas, sino que el marco de estudio presenta una escala regional, el territorio de la Comunidad Autónoma de Aragón, en el que se han inventariado más de 5.000 explotaciones activas o abandonadas, yacimientos e indicios mineros que podrían llegar a ser explotados según las circunstancias tecnológicas y del mercado.

Por último, cabe destacar que mucha de la información recopilada durante el proceso de revisión bibliográfica podría ser considerada parcial, especialmente en el caso de los hidrocarburos y el empleo de las técnicas de explotación no convencionales. Por un lado, los informes de las empresas que se dedican al sector minero y de los hidrocarburos tenderán a minimizar los efectos adversos que esta actividad genera en el medio ambiente, ensalzando los logros obtenidos, mientras que las plataformas contrarias a la minería y a la fractura hidráulica actuarán de un modo contrario, demonizando este tipo de actividades. Sin embargo, en un tema que genera tanta controversia, es un factor positivo conocer las posturas de los diversos actores implicados y los argumentos esgrimidos a favor y en contra para poder extraer una visión lo más equilibrada posible.

En los próximos dos apartados se detallarán, por separado, algunas de las principales características de la minería tradicional y de la técnica de explotación de hidrocarburos no convencionales conocida como fractura hidráulica. Serán analizados, asimismo, algunos de los impactos al medio natural y humano derivado de la puesta en práctica de ambas labores.

### 2.2.1. Características de la minería y la explotación de aguas

Oyarzun, Higuera, y Lillo (2011) proponen tres características fundamentales que hacen de la minería una actividad singular, diferente del resto de actividades económicas e industriales.

Estos autores destacan, en primer lugar, el **valor localizado** de los yacimientos minerales: los minerales se explotan donde se sitúan los yacimientos. Al contrario de lo que sucede con la puesta en marcha de otras actividades industriales, como la construcción de una fábrica o una granja, donde se realizan estudios de tipo socioeconómico y ambiental para determinar su ubicación óptima, una mina solo se puede situar allí donde se encuentra el recurso mineral explotable (Higuera y Oyarzun, s. f.).

El hecho de que los yacimientos de minerales e hidrocarburos se localicen en puntos concretos y escasos de la corteza terrestre -se estima que tan solo bajo un uno por ciento de la superficie terrestre se localizan depósitos minerales de valor comercial (Hartman y Mutmanský, 2002)- está en la base de la pugna geopolítica, a veces incluso bélica, por el control de los recursos, que será analizada posteriormente en este capítulo de la tesis. Por este motivo, en muchas ocasiones a lo largo de la historia, la necesidad o el deseo de control de los recursos minerales ha provocado que dos o más naciones entren en guerra para conseguir la posesión de ciertos yacimientos (Oyarzun, 2011). Además, el valor localizado de los yacimientos minerales implicará que, en ocasiones, a pesar de existir una masa mineralizada que sea rentable en términos económicos, esta no se pueda explotar por cuestiones geopolíticas o debido a las características ambientales del entorno en el que se localiza (Oyarzun et al., 2011). Esta particularidad de la minería marcará gran parte de los análisis efectuados en esta tesis para determinar el potencial minero de los yacimientos minerales, recursos energéticos y las aguas de la región. No en vano, dos de las tres dimensiones propuestas en el análisis (las denominadas *Aptitud del terreno* e *Inserción socioeconómica*) estudian de un modo directo el territorio donde se localizan dichos yacimientos y las relaciones que se establecen entre el propio yacimiento y los elementos que lo rodean.

La segunda razón que proponen los autores para justificar la singularidad de la minería se corresponde con la **temporalidad de las explotaciones**. Prácticamente todos los recursos incorporados a la base de datos no se pueden renovar en un periodo de tiempo adecuado a la expectativa de vida humana (Cazal y Betzabé Piña, 2015). Los yacimientos minerales son un legado de la historia de la tierra que no volverán a formarse en nuestra escala de tiempo. La única excepción son los acuíferos que nutren las explotaciones de los diferentes tipos de agua que se benefician en la región, siempre y cuando se haga con ellos un uso razonable en el que la velocidad de bombeo no supere las tasas de recarga. De este modo, los yacimientos mineros serán explotados mientras existan reservas suficientes de una calidad adecuada como para permitir hacerlo de forma económicamente rentable. Si el yacimiento deja de proporcionar un beneficio económico a la empresa que lo explota por circunstancias del mercado, por agotamiento de las reservas o por un descenso en la calidad del mineral extraído, la actividad minera cesa (Oyarzun et al., 2011). La limitación temporal de las labores extractivas será un factor determinante a la hora de analizar como la actividad minera se inserta social y económicamente en el territorio.

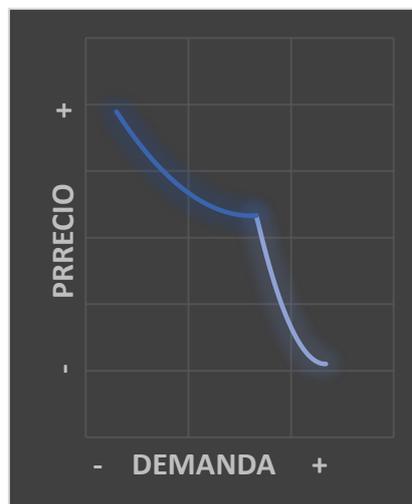
Por otro lado, los yacimientos minerales suelen aparecer enterrados en el subsuelo, bajo potentes espesores de rocas y cobertura edáfica que será necesario movilizar para acceder al cuerpo mineralizado. Además, los minerales que presentan un interés económico, denominados *menas*, aparecen ligados a otros sin valor (*ganga*) (Oyarzun, Higuera, y López García, 2010). Tras su explotación, el producto extraído deberá ser sometido a un proceso de lavado que separe la mena de la ganga (Higuera, s. f.) y, en el caso de los minerales metálicos, a procesos metalúrgicos que permitan concentrar el elemento de interés económico. Todo lo analizado hasta el momento influye en el tercer factor diferencial que incorporan los autores, esto es, la minería genera una **cantidad de residuos muy elevada**, infinitamente mayor que el producto obtenido. Este hecho provoca un problema muy importante para las empresas mineras: qué hacer con la gran cantidad de recursos generados durante el proceso de extracción y procesado de los minerales (Oyarzun et al., 2011). Como se verá más adelante cuando se analicen las balsas y escombreras destinadas a almacenar dichos desechos, así como en el apartado referente a los impactos de la actividad minera, los residuos, además de ocupar grandes extensiones, pueden resultar potencialmente peligrosos para el medioambiente y las personas.

Además de las tres características fundamentales apenas descritas, existen otros rasgos distintivos de naturaleza económica que diferencian la minería del resto de labores. En primer lugar, las actividades mineras llevan asociado un elevado **riesgo económico**, ya que requieren de grandes inversiones de dinero a muy largo plazo. Ligado a este aspecto económico singular, Runge (2012) propone otras cinco características diferenciales de la minería:

1. Cada mina es diferente porque cada yacimiento es diverso. Las características relacionadas con el tamaño del yacimiento, volumen de reservas, morfología, disposición y ley de cuerpo mineralizado, entre otras, hacen único cada yacimiento mineral y son determinantes en la elección del método de explotación (a cielo abierto, subterránea, o por combinación de ambas), que influye en el coste de la operación. Los costes de producción tienden a incrementarse con la profundidad y con el grado de decaimiento, por lo que las operaciones de bajo coste serán extraídas primero, reservando los depósitos más difíciles (Hartman y Mutmansky, 2002).
2. La minería es una industria que requiere de un uso intensivo de capital, que comienza ya en la fase de exploración, por lo que el reembolso del dinero invertido no está garantizado. La relación entre el éxito y el fracaso en las campañas de exploración minera suele ser, además, muy baja (Oyarzun, 2011).
3. La minería a gran escala necesita inyecciones continuas de capital, en ocasiones solamente para poder mantener la producción a la espera de una mejor coyuntura económica en el mercado o de avances tecnológicos que la hagan económicamente rentable.
4. La información sobre las características mineras del yacimiento es cara y obtener datos de entrada fiables para la toma de decisiones complicado. Los sondeos, muestreos y otros análisis son costosos desde el punto de vista económico y, en ocasiones, difíciles de interpretar. De este modo, las decisiones referentes a la explotación se realizan sobre una información imperfecta, que puede ir afinándose a medida que avanzan las labores mineras.
5. Los beneficios obtenidos por la empresa que realiza la explotación son muy sensibles a los ciclos de auge y caída (*Booms and Busts*) de los precios del producto. Por otra parte, cambios en el uso, en las pautas de reciclado o la posibilidad de sustitución por

otro elemento, influyen de forma directa en el precio del producto minero (Hartman y Mutmansky, 2002).

Por otro lado, el precio de los minerales se rige por la ley de la oferta y la demanda (Oyarzun, 2011), aunque a veces se vean sometidos a diversos tipos de control internacional. La minería se encuentra en la base de la pirámide productiva (Runge, 2012), es decir, sus productos serán empleados en la fabricación de otros bienes y servicios consumibles. Por este motivo, la minería (quizás con la excepción de las explotaciones de agua), se diferencia del resto de las actividades industriales en la imposibilidad de crear demanda del producto con el que comercian: *“las empresas no van a comprar más cobre porque está de moda, sino porque lo necesitan para manufacturar sus productos”* (Oyarzun, 2011).



*Figura 2.5. Comportamiento de la demanda de metales en función del precio. Elaboración propia a partir de los datos de las publicaciones “Introducción a la economía y la hacienda pública: Tema 4. Elasticidad oferta y demanda” (Hernández Carrión y Pastor, 2009) y “Recursos Minerales. Tipología, prospección, evaluación, explotación, mineralurgia e impacto ambiental” (Bustillo y López Jimeno, 2000).*

De todos modos, y aunque los precios de los productos mineros se rigen por la ley de oferta y demanda, el comportamiento de la demanda con el aumento de los precios, especialmente en el caso de los metales, actúa de una forma característica (Figura 2.5.). En un primer momento el producto se comporta como un bien inelástico ya que, sea cual sea su precio y debido a su vital importancia en la industria, la demanda permanece relativamente constante. Cuando el producto alcanza un precio determinado se convierte en un bien elástico y su demanda disminuirá al aumentar el precio, puesto que un coste más elevado

favorecerá que se le busque un sustituto en la industria con características similares, pero más barato.

#### *2.2.1.1. Escombreras y balsas*

Los yacimientos minerales suponen un enriquecimiento anómalo en las concentraciones de un determinado elemento o mineral en una zona concreta, que supera ampliamente los valores *normales* de abundancia de ese elemento o mineral en la corteza terrestre. Sin embargo, las concentraciones relativamente elevadas que constituyen los cuerpos mineralizados siguen siendo muy bajas en términos absolutos. Prácticamente la totalidad de las labores mineras que se desarrollan implican la remoción de enormes cantidades de las rocas y suelos que rodean el mineral cuyo interés ha suscitado la puesta en marcha de la actividad extractiva. La cantidad de material removido durante las labores va a depender del tipo de explotación empleada, siendo la minería a cielo abierto la que moviliza un mayor volumen de materiales.

De la mina se extrae no solo roca mineralizada de valor económico, sino también el material denominado “estéril”, que acompaña al mineral que ha suscitado las labores mineras pero que no tiene valor económico, así como mineral con leyes subeconómicas, es decir, aquel cuya concentración no lo hace recuperable con la tecnología y la situación económica presentes en el momento de la explotación. Según el modelo empleado en las labores mineras, parte del material movilizado puede ser reacomodado rellenando los huecos creados por los trabajos de extracción a medida que avanza el frente de explotación. No obstante, en muchas ocasiones y por motivos económicos, parte de estos residuos de la minería son almacenados en estructuras denominadas escombreras, localizadas en las proximidades de la explotación. Asimismo, pueden existir escombreras que se encarguen de almacenar el mineral sub-económico, a la espera de que las condiciones económicas y los avances en la tecnología lo hagan recuperable desde el punto de vista económico.

Los residuos que incluyen roca encajante y cubierta edáfica suelen estar constituidos por materiales inertes, cuya problemática principal será el gran volumen que ocupan. Las estructuras que albergan los minerales de baja ley, al no almacenar materiales estériles, podrían generar problemas de contaminación en los suelos sobre los que se asientan, así

como en la red hídrica superficial y subterránea, debido a la exposición del mineral a los agentes atmosféricos que favorecen las reacciones que movilizan los metales contenidos en el material acumulado.

Por otra parte, el producto que sale de la mina no cuenta con unas concentraciones mínimas que lo hagan directamente comercializable, especialmente en el caso de la minería metálica. Es, por tanto, necesario someter el material extraído a distintos procesos que aumenten la concentración del elemento o mineral del que se quiere obtener un rédito económico. Algunos de estos métodos incluyen la fundición, el refinado electrolítico, la flotación y la lixiviación. Los tres últimos generan desechos, denominados residuos del tratamiento, que en ocasiones se almacenan en balsas en las proximidades del propio frente de explotación y que almacenarán materiales potencialmente peligrosos. Además, excepto en el caso de la fundición, en la que los desechos están constituidos por material vítreo e inerte, los residuos de las técnicas de concentrado contienen restos de la mena, que puede ser potencialmente reactiva expuesta a los agentes atmosféricos y generar el temido drenaje ácido de mina, del que se hablará más adelante.

Tanto las balsas (o relaves) como las escombreras suponen un impacto medioambiental derivado de la actividad minera. En primer lugar son estructuras de un tamaño considerable, con el subsecuente impacto visual y paisajístico que acarrearán. También pueden suponer un problema para la cubierta edáfica. Las infiltraciones procedentes del lixiviado de los minerales presentes en las escombreras tienen la capacidad de contaminar el suelo, mientras que el peso soportado derivado del gran volumen de desechos contenidos en escombreras y balsas provoca la compactación de los suelos, reduciendo su porosidad y variando su comportamiento natural. Hay que recalcar que estos fenómenos pueden ser permanentes, incluso tras ser realizadas las labores de restauración minera.

Tanto las escombreras como las balsas son estructuras inestables y potencialmente peligrosas, especialmente aquellas que albergan residuos altamente contaminantes. Desgraciadamente, existen diversos ejemplos que atestiguan el riesgo asociado a la rotura de balsas y la liberación de grandes volúmenes de residuos contaminantes que provocaron catástrofes naturales de elevado impacto ambiental. Uno de ellos coincide con la ruptura de

la balsa de la mina de Aznalcóllar, en Sevilla, que vertió al río Guadiamar seis hectómetros cúbicos de lodos y aguas ácidas («Aznalcóllar, una mina marcada por el desastre ecológico de Boliden de 1998», 2015); o la ruptura de una balsa que contenía residuos del proceso de obtención de aluminio en la localidad de Ajka ( Hungría) cobrándose la vida de 4 personas y afectando a una superficie de 40 km<sup>2</sup> (de Benito, 2010).

El establecimiento de normas estrictas para la construcción y el mantenimiento de las balsas que eviten los accidentes y las fugas se torna, por tanto, un asunto fundamental. Algunos de los elementos a controlar de forma previa al asentamiento de la balsa estarán relacionados con las características del suelo que determinan su respuesta ante la construcción de estas estructuras y las posibles infiltraciones en el mismo, la peligrosidad sísmica del terreno sobre el que se dispone, la inundabilidad del territorio o la probabilidad de que sucedan eventos tormentosos excepcionales que puedan causar el aumento del nivel del agua, haciendo que se superen los diques de contención o, incluso, lo erosionen, dando lugar a fugas descontroladas.

#### *2.2.1.2. Impactos ambientales*

La minería, como la mayoría de las actividades humanas, produce impactos en el medioambiente y en la población residente en un área más o menos extensa en torno a la ubicación de la labor extractiva. Estos impactos, que en muchas ocasiones se encuentran relacionados entre sí, deben entenderse como el efecto que produce una acción humana sobre el medio, es decir, la diferencia entre la situación anterior y posterior a la actividad considerada (Oyarzun et al., 2011). Aunque todas las acciones humanas generan un impacto en el medio ambiente, la actividad minera es una de las que goza de una peor reputación, en gran parte por la mala praxis de algunas de las empresas de la vieja minería, cuyas actuaciones han calado en la memoria y en la opinión colectiva.

Los impactos mineros al medio se inician en la fase de exploración y se mantienen durante todas las etapas del proyecto e, incluso, tras el fin de la explotación. Los impactos serán mínimos en las fases de exploración y desarrollo: durante el estudio del yacimiento mineral solo será necesario el desbroce de vegetación para la construcción de caminos que permitan la entrada de los vehículos pesados encargados de realizar sondeos y otros análisis.

No obstante, el desbroce de la vegetación localizada sobre el yacimiento aumentará durante la fase de desarrollo -que prepara el terreno para el inicio de la actividad minera-, así como lo harán las emisiones gaseosas procedentes de la maquinaria empleada.

Durante las fases posteriores del proyecto minero, entre las que se incluyen la propia explotación de la mina, la disposición de los desechos de roca y los relaves y el procesado del mineral extraído, el número y la gravedad de los impactos aumentarán considerablemente. Estos impactos pueden seguir produciéndose incluso tras el cierre de la mina, si este no se lleva a cabo de una forma responsable. No en vano, el abandono total o con un mantenimiento nulo por falta de leyes que obligaran a planificar el cierre de las minas fue, hasta los años 80, el mayor riesgo de impacto ambiental (Oyarzun et al., 2011) asociado a la minería. Estos autores incluyen entre las afecciones derivadas del cierre no programado la degradación permanente del paisaje por la presencia de excavaciones, edificios, balsas y escombreras, perturbaciones en la atmósfera por la acumulación de partículas de polvo, contaminación de las aguas superficiales y, finalmente, la posibilidad de que la degradación del territorio lo convierta en un espacio en el que los habitantes viertan sus residuos de forma no controlada.

Los impactos de la minería pueden ser clasificados de numerosas formas dependiendo del criterio empleado. Así, Oyarzun, Higuera y Lillo (2011) proponen categorizarlos según el impacto sea a corto o a largo plazo, directo o indirecto, reversible o irreversible, local o externo y evitable o inevitable. Sin embargo, en esta tesis, se han preferido considerar los impactos según el compartimento del medio afectado, clasificación mucho más visual y de la que surge una buena parte de los indicadores establecidos para el análisis del potencial minero.

Es conveniente destacar que el tipo de minería empleado en la extracción del recurso, es decir, subterránea o a cielo abierto, va a tener ligados unos impactos ambientales característicos. La minería subterránea afecta menos agresivamente al paisaje y a la atmósfera, puesto que es posible, hasta cierto punto, controlar por medio de chimeneas y filtros las partículas emitidas. Sin embargo, es mucho más cara que las labores a cielo abierto. Aunque generalmente son los minerales metálicos y, en ocasiones, los recursos

energéticos los que se extraen mediante minería subterránea, existen numerosos factores que influyen en la elección del método de explotación. Entre estos factores se distinguen parámetros geológicos como la morfología y la ley del yacimiento, la litología del encajante, la presencia de fallas, la geometría del cuerpo mineralizado, el comportamiento mecánico del mineral y del estéril y otros factores económicos e infraestructurales. Como estos aspectos son característicos de cada formación geológica con un potencial interés económico, en el análisis efectuado en esta tesis todos los impactos de la minería han sido analizados de modo conjunto, incorporando los impactos ligados a ambos tipos de explotación.

La clasificación empleada en esta tesis para la presentación sistemática de los impactos derivados de la actividad minera sigue las pautas de la *Guía Para Evaluar EIAs<sup>1</sup> de Proyectos Mineros*, publicada por la *Environmental Law Alliance Worldwide (eLAW)*, si bien su desarrollo se nutre, principalmente, de las ideas de Lillo, Oyarzun e Higuera.

#### IMPACTOS EN LOS RECURSOS HÍDRICOS

Los recursos hídricos son uno de los principales compartimentos del medio afectados por los impactos de la minería, incluyendo la pérdida de calidad y disponibilidad del agua en los alrededores del área en la que se desarrolla el proyecto. Las aguas no solo son receptoras de la contaminación procedente de las labores mineras, sino que también actúan como agentes de transporte de dichas perturbaciones e, incluso, como se verá más adelante son inductoras del proceso de contaminación (Oyarzun et al., 2011).

- **Cambios en la dinámica fluvial e hidrogeológica**

Cuando las excavaciones ligadas a la extracción minera interceptan el nivel freático se produce la anegación de las galerías subterráneas o del fondo de la mina a cielo abierto. Para que las labores puedan seguir avanzando es necesario bombear y descargar esta agua en otros lugares, acción que genera importantes efectos en el régimen hidrogeológico, incluyendo variaciones en el nivel freático y en el régimen de recarga de los acuíferos y

---

<sup>1</sup> Evaluación de Impacto Ambiental

modificación del flujo subterráneo. Los cambios en el nivel freático pueden condicionar el secado de pozos productivos, generando problemas en el aprovechamiento de las aguas del entorno de la labor minera.

- **Pérdidas de masas de agua**

Por la ocupación de lagos, embalses y bahías con desechos de roca procedentes de la actividad minera.

- **Impactos por embalses de relaves, escombreras y desechos de rocas**

Estas estructuras auxiliares provocan graves impactos en la calidad de las aguas, incluyendo contaminación de las aguas subterráneas localizadas debajo de estas instalaciones y en las aguas superficiales que reciben sus descargas.

- **Drenaje ácido de mina, lixiviados contaminantes y fugas de agentes contaminantes**

Una forma especialmente preocupante de contaminación de las aguas vinculada a la minería y las labores extractivas es el denominado drenaje ácido de minas o *AMD*, por sus siglas en inglés. El potencial de generación del drenaje ácido de minas es una cuestión clave en los proyectos mineros, incluso determinará si la propuesta es o no ambientalmente aceptable. Su relevancia ambiental y el peso otorgado al indicador correspondiente en el análisis propuesto en esta tesis justifican un análisis más extenso que el del resto de los impactos tratados en esta revisión bibliográfica.

El drenaje ácido de mina es un proceso que afecta tanto a las aguas como a los suelos localizados en el entorno de la actividad minera. Al interaccionar con los productos mineros o con los residuos almacenados en escombreras y balsas, las aguas superficiales pueden ver modificadas sus propiedades físico-químicas por la incorporación de sustancias inorgánicas procedentes del lixiviado de metales, el aumento de la turbidez del agua por movilización de partículas sólidas, la adición de sales o de metales pesados a las aguas, el aumento de su temperatura o variaciones en el pH. No en vano, el agua es el principal reactivo que provoca la alteración química de la fase sólida, así como el agente más importante de transporte, movilización y dispersión de los contaminantes derivados de la minería (Oyarzun et al.,

2011). Los agentes contaminantes movilizados por el agua pueden infiltrarse en los suelos, generando una perturbación permanente en ellos o, incluso, estos efluentes líquidos pueden continuar su camino hasta alcanzar las masas de agua subterránea. La contaminación de los suelos, de las aguas de escorrentía y de los acuíferos puede tener consecuencias muy graves en la actividad biológica de seres humanos, animales y plantas.

El proceso de generación del drenaje ácido de mina comienza con la oxidación de la piritita y de otras menas sulfuradas al verse expuestas al oxígeno y al agua. Aduvire (2016) distingue tres etapas en la formación del drenaje ácido de mina. En la primera etapa, el hierro ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ) liberado tras la oxidación de las menas sulfurosas se oxida químicamente en hierro férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ) que precipita en forma de hidróxidos, aportando acidez al medio.

Posteriormente, la acidez acumulada supera la capacidad de neutralización del entorno, haciendo que el pH descienda. En esta fase se forma ácido sulfúrico e hidróxido férrico, que aportan el característico tono amarillento de las aguas ácidas de mina. Finalmente, en la tercera etapa, debido a diversas reacciones químicas se producen grandes cantidades de ácido. Los bajos valores de pH típicos de las aguas formadas por el drenaje ácido de mina inducen a la lixiviación de los minerales con los que entra en contacto, favoreciendo la introducción en el flujo acuoso de cationes, aniones y elementos en disolución. Estudiando su composición, es común encontrar concentraciones elevadas en  $\text{SO}_4$ , Fe, Mn y Al y, en menor medida, en Ca, Na, K, Mg, Zn, Pb, Hg, Cd, Ni y otros elementos. La presencia de estas sustancias y la alta acidez suponen una importante forma de contaminación que puede afectar negativamente a la vida de plantas y animales, e incluso, dañar algunas estructuras construidas por el hombre.

El drenaje ácido de mina se puede producir de forma natural en cualquier mineralización que contenga menas sulfuradas si el yacimiento se encuentra expuesto a los agentes atmosféricos, sin necesidad de que estas se hallen asociadas a una labor extractiva. No obstante, las actividades mineras multiplican y aceleran el problema, puesto que durante la extracción y el almacenado se pone en contacto directo este tipo de minerales con el oxígeno y las aguas meteóricas o subterráneas. En cualquier caso, y aunque el drenaje ácido de minas está típicamente vinculado con la explotación de menas metálicas, también se origina en las labores mineras de algunos recursos energéticos como el carbón o el uranio.

La actividad extractiva juega un papel crucial en la generación del drenaje ácido de mina debido, principalmente, a que provoca un aumento en el grado de exposición de las menas ricas en sulfuros. La consecuencia directa de la actividad minera es la *geodisponibilidad* de materiales hacia el medioambiente, al dejar expuestos ciertos elementos que antes no lo estaban (Aduvire, 2016). La extracción del mineral de interés económico supone la eliminación de toda la roca encajante, que antes lo aislaba de los agentes atmosféricos, dejándolo expuesto al agua y al oxígeno ambiental. El proceso extractivo genera modificaciones cruciales, tanto en la mena como en la roca encajante, que aceleran la generación de aguas ácidas. El tamaño de los minerales generalmente se ve reducido, hecho que influye de forma significativa en el proceso de formación del drenaje ácido al aumentar la superficie específica.

Por otro lado, las labores mineras también pueden provocar un aumento de la permeabilidad en la zona en la que se realiza la actividad, debido a la fracturación del macizo rocoso. La propagación de la permeabilidad inducida juega un doble papel en relación con el drenaje ácido, puesto que por un lado aumenta el volumen de agua en contacto con los materiales, acelerando y multiplicando tanto la generación de aguas ácidas como el lixiviado de minerales metálicos, y por otro, permitirá una mayor migración de las aguas ácidas cargadas de elementos inorgánicos hacia los suelos y aguas subterráneas. Además, las superficies minerales de reciente generación son más fácilmente lixiviables, por lo que aportarán un mayor número de contaminantes en comparación con los materiales de igual litología que no han sufrido ninguna modificación.

Una situación especialmente favorable para la generación de drenaje ácido de mina es la constituida por las escombreras que almacenan mineral subeconómico. En ellas se acumula el material fracturado, que ofrece una amplia superficie de reacción con el agua y el oxígeno. Además, se trata de estructuras poco compactadas de elevada permeabilidad. En estas condiciones las superficies de reacción mineral-aire-agua son muy numerosas, lo que favorece la puesta en marcha del proceso de generación de aguas ácidas.

En cualquier caso, ciertos condicionamientos naturales tienen la capacidad de amortiguar y limitar los efectos del drenaje ácido de mina. Por ejemplo, las rocas y minerales

carbonatados, especialmente la calcita y la dolomita, reaccionaran con el ácido reduciendo la concentración de hidrogeniones ( $H^+$ ) en la solución y disminuyendo la acidez de la misma. El contacto con algunos minerales aluminosilicatados, típicos de rocas volcánicas y plutónicas, también consume acidez, sin embargo, la velocidad de la reacción será mucho más lenta, limitando la capacidad de amortiguamiento. Además, estos minerales cuentan con la desventaja de que se alteran fácilmente expuestos a los agentes atmosféricos, perdiendo su capacidad de reacción con los ácidos. Por otro lado, la materia orgánica tiene capacidad de adsorción de cationes procedentes de la lixiviación producida por el drenaje ácido, sin embargo, esta capacidad es dependiente del pH del medio, y en condiciones más ácidas se puede producir la desorción de los cationes adsorbidos.

Una vez formado el drenaje ácido, existen diversos factores que controlarán la migración del frente contaminante en los suelos, como son las condiciones climáticas del medio, la disponibilidad de poros llenos de agua o la presión del agua intersticial. Obviamente, un factor determinante de este avance será la permeabilidad del sustrato. Si esta es muy alta, aunque existan en el suelo minerales capaces de reducir la acidez de la solución ácida, la reacción será limitada y la amortiguación escasa.

La generación y propagación del drenaje ácido de mina serán especialmente peligrosas cuando la mina es abandonada sin que se haya efectuado una reparación del medio siguiendo un plan de restauración previamente trazado. Afortunadamente, en la actualidad, y al menos en el mundo desarrollado, la aprobación de un plan de restauración de los terrenos mineros es un requisito indispensable previo a la apertura de cualquier explotación minera.

Por otro lado, cabe señalar que, a pesar de no ser tan frecuente como el drenaje ácido de minas, existe también el drenaje alcalino, que puede ser igualmente nocivo. Se forma cuando los efluvios mineros entran en contacto y reaccionan con rocas calizas y dolomíticas. Además, la explotación de sales sódicas y potásicas puede provocar un aumento en la salinización de las aguas, sobre todo cuando estas son acumuladas en escombreras localizadas a la merced de los agentes atmosféricos (Oyarzun et al., 2011), reduciendo la calidad de los recursos hídricos afectados.

Finalmente, las fugas e infiltraciones de combustible, soluciones ácidas y otros agentes tóxicos empleados en las labores mineras, procedentes de depósitos de almacenamiento, balsas de residuos, o de la propia actividad extractiva y la maquinaria empleada en la perforación y transporte del mineral, tienen también la capacidad de generar serios problemas de contaminación en los suelos y en las aguas localizadas en el entorno donde se están llevando a cabo estas labores.

#### IMPACTOS EN LA CALIDAD DEL AIRE

La emisión de partículas contaminantes al aire se produce durante todas las etapas del proyecto minero, si bien se concentra durante las fases de exploración, desarrollo, construcción y operación. Además, las escombreras que almacenan desechos de roca contienen partículas finas que pueden ser dispersadas por el viento (eLAW, 2010). Estos tipos de contaminantes proceden de numerosas fuentes y pueden tener diversa naturaleza.

- **Emisiones sólidas**

Se trata de polvo transportado por el viento y emitido durante las propias labores extractivas por la voladura del macizo rocoso y durante la molienda, carga, descarga y transporte del producto extraído. Se incluyen dentro de estas emisiones el polvo de los caminos levantado por el paso de los camiones de transporte y otros vehículos, así como la remoción eólica del material fino de escombreras y balsas abandonadas. La naturaleza de estas partículas está relacionada con el recurso explotado y con la litología del encajante. Las partículas de sílice pulverizada en la atmósfera, así como los asbestos, son especialmente preocupantes, ya que pueden afectar gravemente a la salud de las personas y del ganado, generando enfermedades como la silicosis y la asbestosis.

- **Emisiones gaseosas**

Estos gases proceden de la quema de combustibles, tanto en fuentes estacionarias y fuentes móviles, como en el procesamiento de los minerales una vez extraídos. Dentro de las emisiones procedentes de fuentes móviles se incluyen los gases de combustión de los carburantes empleados por los vehículos utilizados en las operaciones de excavación, los destinados al transporte de personal y los camiones usados en los procesos de transferencia

del material extraído. Estas emisiones suelen ser pequeñas, aunque en conjunto tienen un efecto significativo (eLAW, 2010). Sin embargo, la mayor parte de las emisiones gaseosas están relacionadas con la quema de combustible en los procesos post-extractivos de procesamiento del mineral (pirometalurgia).

También pueden ser liberados gases durante el proceso de extracción del recurso (CO<sub>2</sub>, CO y grisú en la minería del carbón) y en la deflagración de los explosivos. Por otro lado, la cocción de materiales cerámicos genera ácido fluorhídrico, por la presencia en las arcillas empleadas de materiales fluorados (Oyarzun et al., 2011). Se trata de un contaminante muy agresivo que puede provocar graves afecciones en los pulmones y las mucosas.

- **Aerosoles**

Relacionados, principalmente, con los procesos post-extractivos, como la pirometalurgia e hidrometalurgia. También pueden ser liberados durante la explotación del mineral.

- **Ruido y onda aérea**

Las fuentes de emisión de ruido son muchas y muy diversas e incluyen los motores de los vehículos, la carga y descarga de las rocas, las voladuras, la excavación y la perforación del frente rocoso y la molienda del producto extraído. Causa molestias a la población más próxima a la labor minera, además de afectar a la vida de la fauna silvestre.

La onda de choque se genera por el explosivo empleado en las voladuras. Se trata de una onda de presión que se propaga por el aire, se atenúa con la distancia y genera vibraciones. Son diferentes de las ondas de sonido, ya que provocan un cambio repentino y violento en el estado tensional del medio en el que se propaga (Lillo, s. f.).

## **IMPACTOS EN LA CALIDAD DEL SUELO**

Los suelos son uno de los compartimentos del medio que sufren de forma más directa las consecuencias de la actividad extractiva. Este tipo de labores pueden contaminar grandes extensiones de suelo y modificar gravemente el paisaje por la remoción de materiales (eLAW, 2010), alterando profundamente los usos del suelo e impidiendo el desarrollo de otras actividades económicas como la agricultura. La contaminación de los

suelos como consecuencia de la actividad minera puede estar relacionada con la acumulación de partículas contaminantes arrastradas por el viento o por los derrames de productos químicos y residuos mineros. El suelo es además el soporte sobre el que se realizan las actividades de transporte y donde se ubican las escombreras (Higueras y Oyarzun, s. f.).

Lillo (s.f.) diferencia los impactos de la minería sobre los suelos en función de las propiedades de este medio que se ven afectadas. Así, incorpora dentro de las pérdidas de las propiedades físicas aspectos como las variaciones en la textura, porosidad y permeabilidad, la deposición de partículas, la formación de costras, la compactación y mezcla de horizontes, la pérdida física de suelos por extracción y el arranque o acumulación de vertidos, entre otras. La contaminación por metales pesados, metaloides e hidrocarburos procedentes de efluentes líquidos y sólidos, la acidificación por acumulación y oxidación de sulfuros, el drenaje ácido de minas y la adición de sales al suelo están incluidos dentro de la pérdida de propiedades químicas.

Los suelos son un medio muy delicado y sensible a las perturbaciones. La alteración de sus propiedades físicas o químicas será a menudo definitiva, y dificultará una restauración completa de los espacios destinados a la actividad minera y su vuelta al estado original, incluyendo los usos del suelo que sostenían de forma previa al inicio de dichas labores (Oyarzun et al., 2011).

#### **IMPACTOS DE LA MINERÍA EN LA VIDA SILVESTRE**

La minería afecta de manera notable a todos los seres vivos que habitan en el entorno de la labor minera, incluyendo las plantas y los animales que necesitan una protección especial. Algunos de los impactos ya analizados, como la pérdida de la capa superficial del suelo, la liberación de elementos contaminantes y la generación de ruidos (eLAW, 2010) provocarán alteraciones significativas de los hábitats y en las formas de vida de dichas especies. Esta misma fuente considera un efecto importante de la minería en la vida silvestre la fragmentación de los hábitats en espacios más reducidos, que impiden la migración natural de las especies autóctonas e influye en la reducción del número de ejemplares.

## OTROS IMPACTOS AMBIENTALES

La minería tiene otros efectos sobre el medio ambiente destacables. Aunque existan numerosos ejemplos más, a continuación se referirán los más notables:

- Impacto visual y modificación del paisaje, si bien estos efectos deberían ser temporales puesto que en la minería moderna se exige a las empresas la restauración del paisaje después de finalizar la actividad extractiva labores (Oyarzun et al., 2011).
- Desertización y deforestación.
- Activación de procesos de ladera.

Si las afecciones ambientales no son manejadas de una manera adecuada podrían generar graves daños en la salud de las personas por procesos como la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, la emisión de partículas tóxicas al aire o la contaminación de los suelos destinados a la actividad agrícola. La problemática ambiental de la minería, como el del resto de actividades económicas, entró hace unas décadas en un escenario completamente diferente al generalizarse el principio de sostenibilidad como efecto del concepto de desarrollo sostenible, aspecto que se expondrá en apartados posteriores.

### 2.2.1.3. Impactos sociales y económicos de los proyectos mineros

El impacto socioeconómico más importante ligado a los proyectos mineros es la posibilidad de crear riqueza en el lugar donde se asienta la actividad. El desarrollo de proyectos mineros ofrece puestos de trabajo y, en ocasiones, la mejora de infraestructuras en el entorno. Sin embargo, la minería puede provocar al mismo tiempo grandes perturbaciones sociales en los lugares en donde esta se desarrolla. Todas estas consideraciones están recogidas en una amplia bibliografía, cuyos conceptos más relevantes serán expuestos a continuación.

La minería, igual que el resto de actividades económicas e industriales, tiene un impacto socioeconómico en las poblaciones localizadas en su área de influencia. Este impacto solía ser uno de los factores positivos para la implantación de una actividad minera, especialmente en áreas económicamente poco desarrolladas, al ofrecer puestos de trabajo

directos e indirectos, construcción y mejora de infraestructuras de transporte, aumento de la población, etc. (Oyarzun et al., 2011). Por otra parte, la región donde se ubica la labor extractiva también percibirá una mayor recaudación por los impuestos derivados de dicha actividad.

Gran parte del territorio rural aragonés podría clasificarse dentro de estas áreas económicamente menos desarrolladas, envueltas en lo que algunos autores denominan como efecto sumidero (Figura 2.6. y

Figura 2.7.): círculo vicioso que se inicia porque el declive en la inversión y en las oportunidades en el medio rural propician el vaciado poblacional, consecuencia que justifica, a su vez, la ausencia de inversiones (Gómez Orea, 2002). Esta espiral, en el que el desempleo y la falta de servicios conducen al éxodo rural, ha sido un patrón común en las regiones rurales desde que el sector agrícola comenzó a perder peso (OECD, 2006).



Figura 2.6. (Izquierda): Efecto sumidero en el medio rural. Modificado de Gómez Orea (2002), "Marco conceptual de la Ordenación Territorial".

Figura 2.7. (Derecha) Círculo del declive de las regiones rurales. Modificado de OECD (2006), "The New Rural Paradigm: Policies and Governance".

Sin embargo, el aumento de inversión económica en el área o la introducción de una nueva industria pueden romper este círculo vicioso, pasando, incluso, de una espiral de declive a una espiral de progreso (Figura 2.8.).

No obstante, Slack (2009) afirma que la minería moderna, que es intensiva en el uso de capital, genera muy pocos empleos directos, pero que el territorio podría verse beneficiado por el efecto multiplicador a través de los bienes y servicios que requiere (Oyarzún y Oyarzun, 2011). Que estos beneficios sean aprovechados o no dependerá de la competencia de los gobiernos locales y del interés de las empresas mineras. El concepto de multiplicador, o multiplicador regional (Kuby, Harner, y Gober, 2000), es fundamental para comprender el proceso de desarrollo acumulativo (Dicken y Lloyd, 1990). Para explicar su teoría, en la que el desarrollo de una región está determinado por sus exportaciones, estos autores dividen la economía de los territorios en dos sectores excluyentes:

- El Sector de Exportación, que algunos autores denominan como industrias de base (Kuby et al., 2000), y que incluye todas las actividades en las que la demanda es externa a la región.
- El Sector Residencial, o industrias de base de consumo, compuesto por aquellas actividades en las que la demanda se sitúa dentro de la propia región, supliendo las necesidades diarias de la población residente.

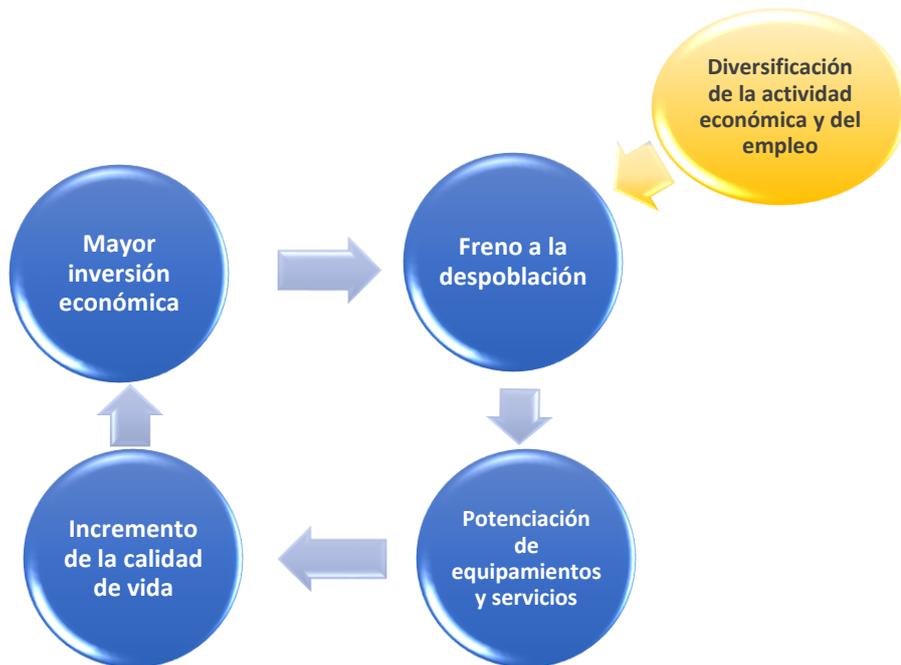


Figura 2.8. Espiral del progreso. Modificado de Velasco (2001), "Acciones de política territorial: públicos en espacios rurales".

Ambos sectores conforman el total de la economía de la región. La relación entre ambos sectores es constante, puesto que, según la teoría desarrollada por Dicken y Lloyd, la actividad residencial depende completamente del nivel de exportaciones. De este modo, la incorporación a la economía local de una actividad que aumente las exportaciones, no solo incrementaría la importancia del Sector de Exportación, sino que al ser dependiente de este, también se produciría un repunte en el denominado Sector Residencial y, por ende, de la Economía Total (Figura 2.9.). Los conceptos volumen o importancia empleados anteriormente hacen referencia en términos efectivos a un aumento en el número de trabajadores o a un mayor volumen monetario.

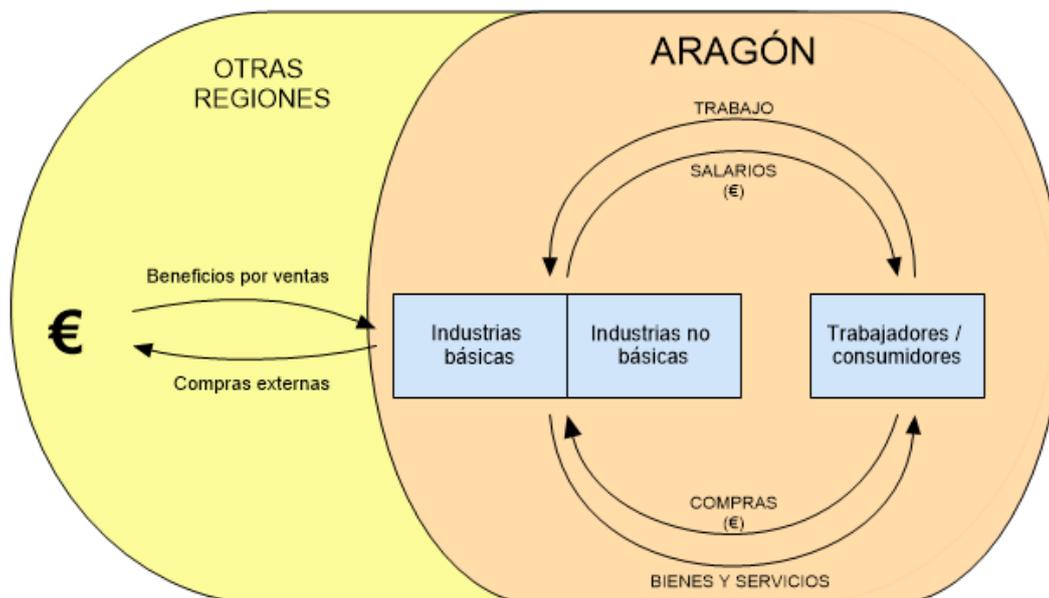


Figura 2.9. Mecanismo del modelo de base económica. Modificado de "Human Geography in Action" (Kuby et al., 2000).

En el caso concreto de una nueva explotación minera, esta aportaría, de forma directa, un aumento en el volumen de la economía de la región donde esta se localiza, así como un número concreto y limitado de puestos de trabajo en la propia labor extractiva. La puesta a punto de esta actividad económica posiblemente requiera de una mejora de las infraestructuras del territorio y, una vez activa, la subcontratación de empresas que cumplan determinadas funciones asociadas a la labor minera, como el transporte de material o el mantenimiento de los edificios auxiliares, lo que se traduce en un aumento del volumen económico de la región y de una cantidad variable de puestos de trabajo indirectos, pero ligados a la actividad minera. Además, si estos trabajadores y sus familias se asientan en el territorio, el aumento de servicios ligados a lo que Dicken y Lloyd denominaban Sector Residencial será incluso mayor, al verse amplificada la demanda de servicios como la construcción, la alimentación o la educación, inherentes al aumento de la población. De esta manera se abandona la espiral del declive, introduciéndose el territorio en la espiral del progreso.

Slack (2009), determinó que era esencial analizar cómo la explotación minera puede relacionarse con el desarrollo de otros sectores económicos (Oyarzún y Oyarzun, 2011). Estos dos autores proponen como aspectos fundamentales para fomentar esta relación:

1. La búsqueda de mecanismos efectivos que sirvan para potenciar otros sectores de la economía a partir de la demanda de bienes y servicios, y de los ingresos entregados por la minería.
2. Encontrar mercados externos para que los productos no mineros de la región puedan sustituir los beneficios de la minería en momentos de crisis o tras el cese de la actividad.

Desafortunadamente, esta es una situación ideal que, a veces, poco se corresponde con la realidad. En ocasiones, los rasgos propios del territorio en los que se localiza la explotación minera, así como las características de este tipo de actividad económica condicionan el éxito del llamado efecto multiplicador. Por una parte puede decirse que la minería tiene “fecha de caducidad”. Exceptuando las explotaciones ligadas a los recursos hídricos, siempre que se realicen de una forma responsable y no se supere la capacidad de recarga del acuífero, los recursos analizados en esta tesis no son renovables. Es decir, el yacimiento que ha suscitado la labor extractiva será viable temporalmente, mientras existan reservas del material explotado y estas reservas sean de una calidad suficiente como para que las labores tengan un beneficio económico que las hagan rentables (Higueras y Oyarzun, s. f.). Oyarzún y Oyarzun (2011) y Oyarzun e Higueras (s.f.) proponen además otra serie de factores que podrían suponer el fin de la actividad minera, a veces de forma abrupta: la entrada en escena de contrincantes que ofrecen sus productos a precios con los que no se puede competir, que el mineral o producto ofrecido sea sustituido en el mercado, las fluctuaciones en los precios del mercado, la entrada en vigor de medidas de protección ambiental que hagan inviable la operación económica de una mina o sucesos relacionados con fenómenos naturales catastróficos.

Este carácter temporal de las explotaciones influye, en gran medida, en el que la situación idílica comentada cuando se analizaba el efecto multiplicador en muchos casos no se haga efectiva. La mejora de los medios e infraestructuras de transporte, sumada a la temporalidad de los trabajos ofrecidos en la explotación minera, puede hacer disuadir a los empleados de establecerse en el entorno de la explotación, prefiriendo trasladarse diariamente desde su lugar de origen, si este no es muy lejano, o desde alguna localidad cercana que cuente con un mayor número de servicios. En otras ocasiones, no solo no se

pone en marcha el denominado efecto multiplicador sino que puede llegar a producirse un efecto contrario en aquellas áreas donde no se aprovecharon los beneficios y oportunidades que otorgaba la explotación del recurso mineral para la potenciación y despegue de otras actividades económicas que pudieran asegurar el futuro económico sostenible de sus habitantes una vez cesara la actividad minera. En estos casos, se puede llegar a culpar al recurso explotado de la situación generada (Oyarzún y Oyarzun, 2011).

Por otro lado, la propia naturaleza rural del territorio puede suponer un freno a la actuación del efecto multiplicador. Y es que, en una parte importante del territorio aragonés, el área de influencia de las potenciales explotaciones mineras se localiza en zonas casi despobladas en las que sería muy probable que, por una parte, no existiera población lo suficientemente joven para cubrir los puestos de trabajo requeridos por la explotación minera, y por otra, los núcleos de población no fueran atractivos en términos demográficos y de servicios para que los trabajadores venidos desde fuera de la región se asentarán en ella y no en núcleos poblacionales mayores aunque más alejados. Puede suceder, también, que la dinámica económica de las áreas rurales requiera de actividades que se establezcan de forma más continuada en el tiempo para forzar los efectos del multiplicador regional.

Finalmente, el aumento de la población consecuencia de la migración de los trabajadores hacia el lugar donde se localizan las explotaciones puede producir tensiones, especialmente en áreas rurales, entre los habitantes del territorio y los nuevos arribados, especialmente si los primeros ven amenazadas sus formas de vida tradicionales. Por otro lado, las labores mineras realizadas de manera poco aconsejable podrían provocar la degradación de los suelos, las aguas, los recursos forestales y otros elementos necesarios para las actividades productivas y la subsistencia de la actividad local (eLAW, 2010), incluida la agricultura, tan importante en el contexto económico rural de la Comunidad Autónoma de Aragón. En este mismo sentido, la degradación del patrimonio cultural y paisajístico, así como de otros elementos relacionados con el turismo rural, deportivo y de montaña, generará un impacto negativo en aquellas áreas en las que estas actividades sostienen la economía.

### 2.2.2. Fractura hidráulica

Como se comentó al comienzo de este apartado, los elementos teóricos relativos a los hidrocarburos no convencionales y las particularidades técnicas de la fractura hidráulica, serán expuestos en un subapartado diferente, al presentar unas peculiaridades que merecen ser abordadas de forma individual.

Prácticamente, la totalidad del petróleo y el gas natural producido y consumido a lo largo de la historia proceden de reservorios relativamente grandes y permeables. Tradicionalmente, la extracción de hidrocarburos se ha realizado mediante pozos verticales utilizando procedimientos estándar y requiriendo de un procesamiento mínimo antes de su venta y utilización. En épocas recientes, este tipo de combustibles han sido catalogados con la etiqueta de hidrocarburos convencionales, en contraposición con los no convencionales, que serán aquellos cuya extracción necesite de tecnologías más complejas por sus peculiaridades geológicas.

En los siguientes subapartados serán introducidos conceptos básicos relativos a la generación de los hidrocarburos, a las características fundamentales de los depósitos de petróleo y gas convencionales y a la explotación de los no convencionales empleando la técnica conocida como fractura hidráulica.

#### 2.2.2.1. Principios de la formación de los hidrocarburos

Los hidrocarburos son compuestos orgánicos formados por átomos de carbono e hidrógeno. La longitud de la cadena, que viene definida por el número de átomos de carbono, determina la fase en la que el hidrocarburo se encuentra en condiciones de temperatura y presión normales. Los de cadena corta (menos de 5 átomos de carbono) se encuentran en estado gaseoso, mientras aquellos en los que el número de átomos de carbono es superior a 15 serán sólidos. El resto aparecerán en estado líquido en condiciones normales de presión y temperatura.

A pesar de la existencia de teorías abiogénicas para explicar el origen de los hidrocarburos, la mayoría de los geólogos consideran el petróleo y el gas natural como el resultado de la acumulación, enterramiento, preservación y transformación de antiguos

restos orgánicos a lo largo del tiempo geológico. Una vez que el organismo muere comienza el proceso de descomposición y degradación de la materia orgánica. La mayor parte del carbono almacenado en los tejidos orgánicos (casi un 99%) vuelve al ciclo del carbono en forma de CO<sub>2</sub>, por oxidación directa debido a procesos aerobios. Una fracción todavía más pequeña del remanente logra escapar del ciclo del carbono y pasa a formar parte de algún tipo de combustible fósil.

El proceso de generación de hidrocarburos comienza con el depósito de grandes cantidades de materia orgánica en la cuenca sedimentaria. Como consecuencia del enterramiento, la materia orgánica, junto con otros sedimentos de origen inorgánico, se ve sometida a un aumento de sus condiciones de presión y temperatura que conducirá a su transformación progresiva. La generación del petróleo puede dividirse en tres etapas diferentes: diagénesis, catagénesis y metagénesis. Estas divisiones son artificiales, puesto que el proceso es continuo, sin límites bien establecidos (Baker Hughes INTEQ, 1999). Durante la diagénesis se generan grandes cantidades de metano por actividad bacteriana. En esta etapa, la materia orgánica acumulada que no ha sido consumida por los microorganismos tiende a recombinarse formando polímeros, denominados querógenos, que son resistentes a la degradación anaeróbica y que constituyen la fuente de la mayor parte del petróleo y gas natural. No obstante, solo el 10% del querógeno original se transforma en algún tipo de hidrocarburo (Melendez Hevia, 1982).

Con el aumento de la temperatura y la presión consecuencia del mayor enterramiento comienza la catagénesis. En esta fase se produce la formación de petróleo y gas natural por degradación termal. Los sedimentos son compactados por el aumento de la presión y el querógeno formado comienza a ser degradado en hidrocarburos mediante el proceso conocido como *cracking termal*, consistente en la rotura de las largas cadenas moleculares del querógeno y que resulta en la formación de moléculas de hidrocarburos más simples. Existe un rango de temperaturas en las que el petróleo es generado, denominada ventana del petróleo. Por debajo de este rango, el petróleo sigue atrapado en forma de querógeno, mientras que cuando se supera, el producto de la degradación termal del querógeno será gas natural. Finalmente, la metagénesis comienza cuando la materia orgánica alcanza

grandes profundidades. En esta fase el querógeno, empobrecido en hidrógeno, formará metano como único producto.

La capacidad de una roca sedimentaria para generar hidrocarburos va a estar condicionada de un modo fundamental por la cantidad de materia orgánica almacenada en ella. La acumulación de restos orgánicos en los sedimentos se ve favorecida por una alta tasa de producción de materia orgánica y por un alto potencial de preservación (Selley y Sonnenberg, 2014). La riqueza en restos orgánicos de los sedimentos estará determinada por el ratio entre la producción de materia orgánica y las tasas de destrucción de la misma, que dependerá de tres factores fundamentales: la productividad orgánica, las tasas de enterramiento y las condiciones oxidantes o reductoras del medio. Estos tres factores estarán condicionados, a su vez, por una gran cantidad de parámetros diversos, como la cantidad de luz (que a su vez depende de la profundidad del agua, turbidez y latitud), el aporte de nutrientes, la salinidad o la temperatura.

En los océanos abiertos la producción total de carbono orgánico es muy elevada, sin embargo, debido a su dispersión, las concentraciones de materia orgánica en los sedimentos no es lo suficientemente alta. Sin embargo, las concentraciones de materia orgánica sí podrían ser importantes en determinados ambientes someros de los océanos, como áreas de *upwelling*, estuarios, arrecifes, etc. Por otro lado, el factor más influyente en los ecosistemas continentales es el clima, que determina la producción total de materia orgánica.

Una vez acumulada la materia orgánica, la preservación de la misma en los sedimentos es esencial para la generación de rocas madres ricas en materia orgánica. El potencial del medio sedimentario para la conservación de los restos biológicos viene determinado por su carácter anaeróbico y por el tipo y velocidad de deposición del sedimento. El menor tiempo de permanencia de los restos biológicos en la columna de agua antes de su depósito favorece su preservación. El tamaño del sedimento en el que se deposita la materia orgánica juega también un papel fundamental en su conservación, siendo más convenientes los de gran fino. No obstante, el factor más importante para la preservación de la materia orgánica, tanto cuando esta permanece todavía en la columna de agua como cuando ya ha sido

depositada en el sedimento, reside en las condiciones de anoxia del medio, ya que la falta de oxígeno inhibe la actividad bacteriana que degrada la materia orgánica.

Será en estos depósitos sedimentarios relacionados con paleoambientes en los que se favorece la acumulación y preservación de grandes cantidades de materia orgánica donde se deberá centrar la exploración de rocas madres generadoras de petróleo. La primera de estas zonas de depósito son los fondos de cuencas euxínicas, medios caracterizados por la presencia de agua estancada con déficit de oxígeno. La estratificación de la columna de agua inhibe la oxigenación de las aguas del fondo por mezcla con las aguas superficiales. El oxígeno de las zonas más profundas de la cuenca es agotado por procesos de degradación de materia orgánica, produciéndose una fuerte anoxia en el fondo. Otros ambientes propicios para la generación de rocas madre de hidrocarburos son las plataformas carbonatadas, así como los taludes continentales en los que se produce el fenómeno conocido como *upwelling*.

Los deltas son los ambientes de sedimentación de rocas generadoras de petróleo más importantes. En el frente deltaico se produce la estratificación de la columna de agua por los aportes fluviales, generando anoxia en el fondo, al consumirse el oxígeno por el proceso de degradación de la materia orgánica presente.

Dentro de los medios continentales, los lagos son los ambientes donde se localiza una mayor concentración de materia orgánica. Esta procede de bacterias y algas que habitan en el propio lago o de plantas superiores transportadas hasta el cuerpo lacustre.

#### 2.2.2.2. *Hidrocarburos convencionales y no convencionales*

La generación de los yacimientos de hidrocarburos convencionales, proceso bien estudiado y conocido, está controlado por la existencia de una serie de elementos y procesos geológicos, que reciben el nombre genérico de *Sistema del Petróleo*. Se trata de un sistema dinámico que funciona en un espacio y un tiempo restringido y que resulta de la convergencia en el tiempo de una serie de elementos y de procesos geológicos esenciales para la formación de los depósitos de hidrocarburos. Los elementos geológicos que configuran el sistema del petróleo son cinco:

- **Roca madre:** Se trata de formaciones sedimentarias ricas en materia orgánica, que han generado o son capaces de generar hidrocarburos. Como se comprobó en el subapartado anterior, estos tipos de facies proceden de medios con una elevada actividad biológica y que presentan condiciones de anoxia favorables para su conservación. Las rocas madre más comunes estarán caracterizadas por una granulometría fina. Su potencia es también un factor clave en la cantidad de petróleo o gas que será generado. Para que se produzca la acumulación de hidrocarburos en reservorios, la roca madre no solo deberá ser rica en materia orgánica y propensa a formarlos sino que, además, permitirá que los hidrocarburos generados migren hasta la roca almacén.
- **Roca reservorio o almacén:** Los hidrocarburos se almacenan en los poros de las formaciones rocosas, entre los granos de las rocas sedimentarias o en las cavidades presentes en los carbonatos. Para que una roca pueda actuar como reservorio deberá presentar una porosidad suficiente como para albergar los hidrocarburos y que estos poros estén conectados para que los fluidos puedan desplazarse por su seno. Teóricamente, cualquier roca puede actuar como reservorio de gas o petróleo, aunque en la práctica se localizan en areniscas o carbonatos (Selley y Sonnenberg, 2014).
- **Roca sello:** Formación geológica impermeable que el petróleo y el gas no pueden atravesar.
- **Ruta de migración:** Vías favorables para el desplazamiento de los hidrocarburos desde la roca madre hasta la trampa.
- **Trampa:** Configuración geológica que provoca que el petróleo y el gas queden retenidos en una roca almacén porosa o que los escapes sean mínimos.

Para que se forme un depósito económico de gas o petróleo es necesario que, además de los elementos geológicos descritos, converjan en el espacio y tiempo una serie de procesos que comienzan con la generación de los hidrocarburos. Los cinco procesos básicos implicados en el Sistema del Petróleo son:

- **Generación:** Proceso que incluye el enterramiento de la roca madre, que alcanza una temperatura y presión suficientes como para transformar la materia orgánica presente en el sedimento en hidrocarburos.
- **Migración:** Hace referencia al movimiento de los hidrocarburos desde el interior de la roca madre hasta la trampa, donde quedarán almacenados en el reservorio. Se cree que la principal causa del movimiento del petróleo radica en la compactación de los materiales sedimentarios (*Fundamentals of Petroleum Geology*, 1999).
- **Acumulación:** Se origina cuando el volumen de hidrocarburos que llega a la trampa es mayor a las fugas que se producen desde ella.
- **Preservación:** Que indica que el hidrocarburo almacenado en el reservorio no ha sido alterado biológicamente o por ninguna otra causa.
- **Tiempo:** El momento en el que se generan u ocurren los diferentes elementos y procesos implicados en el Sistema del Petróleo es fundamental para la existencia de acumulaciones de hidrocarburos. Estos tienen que seguir una secuencia más o menos definida puesto que si, por ejemplo, la formación de la trampa es anterior a la migración del petróleo o el gas desde la roca madre podrá producirse una acumulación económicamente productiva, mientras que si por el contrario, la trampa es posterior a la migración, el almacén será yermo (Selley y Sonnenberg, 2014).

Si alguno de estos elementos o procesos falla, será imposible que se origine una acumulación de hidrocarburos de los denominados convencionales. Sin embargo, en las últimas décadas, la exploración y el desarrollo tecnológico han hecho posible la extracción de gas y petróleo a partir de configuraciones geológicas diversas. Son los denominados hidrocarburos no convencionales. Durante mucho tiempo, la dificultad técnica y el coste económico, así como la facilidad con la que se extraía petróleo y gas en los campos tradicionales, han hecho que no se prestara demasiada atención a estas “nuevas” fuentes. No obstante, el agotamiento de los campos petrolíferos tradicionales, la dificultad de encontrar yacimientos nuevos y el desarrollo tecnológico, han puesto el foco sobre estas fuentes de hidrocarburos. En cualquier caso, lo que en la actualidad se considera como no convencional puede convertirse en convencional en el futuro, a medida que la tecnología y el conocimiento geológico avancen (Hilyard, 2012). Lo esencial en todos los tipos de hidrocarburos no convencionales es la existencia de una roca fuente rica en materia orgánica

propensa a formar gas y petróleo, aunque en algún caso, no es indispensable que estos hayan sido generados durante el enterramiento.

Entre los principales tipos de hidrocarburos no convencionales se incluyen las *tar sands/oils sands*, conocidas como arenas bituminosas en español, el *deep gas*, el *tight gas*, los hidratos de metano, el gas metano de carbón, los *oil shales* y el *shale oil* y *gas shale*.

Estos últimos son los que toman una mayor importancia en la tesis, ya que una de las metas planteadas al inicio de la misma consistía en analizar el potencial de algunas formaciones rocosas de la C.A. de Aragón como rocas madre para la producción de *gas shale*. En el *shale oil* y el *gas shale*, los hidrocarburos explotables quedan atrapados en la matriz de una roca madre de grano fino cuya permeabilidad es insuficiente como para haber permitido la migración de los fluidos generados hasta la roca almacén. Para poder recuperarlos será necesaria la creación de nuevas vías de permeabilidad artificial mediante fractura hidráulica que permitan el movimiento de los hidrocarburos hasta el pozo. El desarrollo (o, más bien, el uso combinado) de tecnologías relativamente nuevas, como son la fractura hidráulica y los pozos horizontales han centrado el interés en este tipo de hidrocarburos que hasta hace pocas décadas se pensaban irrecuperables.

Las rocas de tipo *shale*, traducidas erróneamente como esquistos o pizarras, son las formaciones sedimentarias más comunes, pudiéndose encontrar a lo largo de todo el mundo (Energy Institute, 2015), así como el elemento fundamental en el proceso de explotación de hidrocarburos no convencionales de tipo *shale oil* o *gas shale*. Los *shales* son rocas sedimentarias (a diferencia del esquisto que ha sufrido metamorfismo) blandas y de grano fino, que se rompen fácilmente en láminas finas y paralelas (Hilyard, 2012), constituidas por minerales de la arcilla (>50%) (Energy Institute, 2015). Los *shales* productores de hidrocarburos tienen típicamente una tonalidad oscura o negra, debido a que poseen una alta concentración de materia orgánica.

Los *shales* ricos en materia orgánica que han sido enterrados a una profundidad suficiente como para que los hidrocarburos hayan sido generados y expulsados, pueden albergar todavía grandes cantidades de gas (Hilyard, 2012), o petróleo, debido a que la migración de estos fluidos se verá limitada por la baja permeabilidad de este tipo de

formaciones. Los hidrocarburos generados pueden quedar retenidos en las fracturas existentes en la matriz rocosa o en pequeños espacios porosos, así como ser adsorbidos en la superficie del querógeno y la materia orgánica residual y en los minerales de la arcilla. De este modo, los *shales* generadores de hidrocarburos van a actuar tanto como de roca madre como de roca almacén. La principal diferencia entre las rocas que actúan como almacén de los hidrocarburos convencionales y el *gas shales* y *shales oil* va a estar ligada a su capacidad de permitir el flujo de estos compuestos en su seno. Los reservorios convencionales presentan permeabilidades típicas de entre 0,5 y 20 md, mientras que los *gas shales* muestran valores de entre  $10^{-5}$  y  $10^{-3}$  md (King, 2012). Es esta baja permeabilidad, consecuencia del pequeño tamaño de las partículas que componen la matriz rocosa, la que implica que las rocas de tipo *shale* no permitan que cantidades suficientes de gas fluyan hasta el pozo (Hilyard, 2012), siendo necesario, por tanto, aumentar su permeabilidad de forma artificial para poder recuperar los hidrocarburos albergados en ellos.

El auge del *gas shale* está relacionado con el desarrollo de dos tipos de tecnologías cuyo uso combinado ha permitido extraer cantidades comerciales de gas y petróleo de este tipo de rocas. Estas tecnologías son la fractura hidráulica, o *fracking*, y los pozos horizontales. La permeabilidad marca si el reservorio debe ser hidráulicamente fracturado (King, 2012), si son muy impermeables necesitan ser fracturados artificialmente para producir cantidades significativas de gas (USGS<sup>2</sup>, 2019). Según esta institución, la fractura hidráulica es un tipo de proceso de perforación de gas y petróleo que implica la inyección de agua, arena y agentes químicos a altas presiones en una formación rocosa. La fractura hidráulica permite incrementar de forma artificial la permeabilidad de las rocas, aumentando el tamaño y conectividad de las fracturas existentes y creando fracturas nuevas para ampliar el flujo de hidrocarburos hacia las canalizaciones del pozo.

Los pozos horizontales, por su parte, permiten acceder a más reservas que los pozos verticales (Boyer, Clark, Jochen, Lewis, y Dallas, 2011), al poner una mayor superficie de la formación rocosa en contacto con las canalizaciones del pozo, así como acceder al petróleo y gas localizados en áreas de difícil acceso y estimularlos de formas que no son posibles

---

<sup>2</sup> U.S. Geological Survey

mediante pozos verticales (Prud'Homme, 2014). Aunque los pozos horizontales cuestan aproximadamente el doble que los verticales, estos producen unas tres veces más cantidad de hidrocarburos (Bennet et al., 2005), además de contar con la ventaja de que a partir de una perforación vertical se pueden obtener entre 4 y 6 pozos horizontales, reduciendo el coste y el impacto ambiental (Prud'Homme, 2014).

### *2.2.2.3. Proceso de extracción de hidrocarburos mediante fractura hidráulica*

El proceso de extracción de hidrocarburos no convencionales mediante fractura hidráulica consta de diferentes fases, que comienzan con la construcción del pozo vertical a partir del cual se desarrollarán los diversos pozos horizontales. El pozo vertical se extenderá hasta pocos metros por encima de la formación de shale rica en hidrocarburos, y posteriormente se desviará, haciéndose horizontal o casi horizontal.

Una vez que la construcción del pozo ha concluido, comienza la fase de estimulación mediante fractura hidráulica. Durante este periodo se emplearán grandes cantidades de agua fresca, arena y agentes químicos. El fluido conformado por estos productos es bombeado a grandes presiones a través de la boca del pozo, consiguiendo amplificar las fracturas naturales existentes en la estructura rocosa del *shale* o, incluso, crear vías de permeabilidad nuevas. La extensión de las fracturas generadas va a estar controlada por la configuración de las formaciones superiores, y por el volumen y la presión del fluido bombeado. La zona confinante limitará el crecimiento de la fractura («Hydraulic Fracturing: The Process», 2010). La arena introducida junto con el agua tendrá, por su parte, un interés como agente propante, que se alojará en las fracturas generadas, evitando que se cierren y favoreciendo el flujo de los hidrocarburos hasta el pozo. Además, deberán ser empleados ciertos productos químicos para que la fractura hidráulica sea efectiva (Energy Institute, 2015).

Las empresas responsables de la fractura hidráulica en Estados Unidos, aseguran que entre un 98 y un 99,5% del fluido empleado en la estimulación hidráulica está constituido por agua y arena, siendo el resto agentes químicos utilizados de forma común en la industria. Algunos de estos elementos son tóxicos, aunque supongan un porcentaje muy bajo de la mezcla (Prud'Homme, 2014). Este mismo autor, asegura que en un estudio de

2011 se decía que en el proceso de fractura hidráulica se utilizan más de 2500 agentes químicos, 650 de ellos cancerígenos. La fórmula exacta varía dependiendo del proceso, puesto que cada pozo es diferente y requiere un diseño propio por las condiciones particulares de cada formación. Muchas veces las empresas se reservan la fórmula exacta del fluido empleado aludiendo al secreto comercial, lo que vigoriza las protestas ambientalistas, amén de imposibilitar la monitorización en el medio de los agentes químicos empleados.

Agrupados según función primordial, se pueden distinguir, entre otros, los siguientes tipos de agentes químicos empleados en el proceso de fractura hidráulica:

- **Geles:** Espesan el agua para mejorar la disposición de los elementos propantes, reduciendo el volumen de agua utilizado.
- **Ácidos:** Reaccionan con algunos minerales de la formación disolviéndolos, lo que permite una producción más eficiente.
- **Inhibidores de la corrosión:** Evitan el deterioro de las tuberías del pozo.
- **Biocidas:** Inhiben el crecimiento de bacterias que podrían afectar al funcionamiento del pozo y a la calidad del producto extraído.
- **Reductores de fricción:** Minimizan los efectos de la fricción en las tuberías del pozo.
- **Agentes propantes:** Junto con la arena, ayudan a mantener las fracturas abiertas para facilitar el desplazamiento de los hidrocarburos.
- **Absorbentes de oxígeno:** Previenen la corrosión de los tubos del pozo.

El proceso de inyección de fluidos a grandes presiones se repetirá en múltiples ocasiones para favorecer la propagación de fracturas en la formación rocosa. Cuando la fractura hidráulica consigue la generación de una permeabilidad inducida suficiente en la formación de *shale* que alberga los hidrocarburos, comenzará el flujo del gas o el petróleo hacia las canalizaciones del pozo horizontal hasta que, finalmente, alcancen la superficie.

#### *2.2.2.4. Impactos del proceso de fractura hidráulica*

La hidrofractura tampoco es un proceso ambientalmente amable. Esta técnica genera, incluso, una controversia mayor que la propia minería. La extracción de petróleo y gas a

partir de rocas de tipo *shale* implica perforaciones, explosiones, utilización de agentes químicos tóxicos y agua bombeada a elevadas presiones (Prud'Homme, 2014).

Las grandes cantidades de agua fresca necesarias para el desarrollo de esta técnica pueden convertirse en un elemento limitante en aquellas áreas donde este recurso no abunda. Además, el agua empleada en este proceso debe estar libre de impurezas, ya que en otro caso la eficiencia de los aditivos puede verse comprometida. Aunque la cantidad de agua necesaria en la fractura hidráulica es elevada, puede considerarse pequeña si se compara con la utilizada para otros usos como la agricultura o la industria. Este volumen es variable y depende de las características geológicas de la formación rocosa, el tipo de pozo y el número de etapas de fractura (USGS, 2019).

El tratamiento de las aguas empleadas y la potencial contaminación de acuíferos y aguas superficiales son problemas asociados a la fractura hidráulica. El agua inyectada para producir petróleo y gas puede ser altamente salina y contener componentes tóxicos (Bjørlykke, 2013). Noticias espectaculares y videos virales sobre ríos que arden en Australia («Llamas en el agua: la prueba que confirma lo peligrosa que es la contaminación por “fracking”», 2016) y llamas en los grifos de las casas en Estados Unidos han propagado la idea entre los grupos ecologistas y la población civil de que las fisuras creadas durante el proceso de fractura hidráulica pueden conectar los acuíferos situados en horizontes superiores con la formación de *shale*, a través de las cuales se producirían fugas de metano y agentes químicos procedentes de los fluidos de fractura, que contaminan las masas de agua subterráneas, los pozos y los suministros para consumo humano. Realmente, esto es algo que puede suceder. Incluso en operaciones realizadas con sumo cuidado, los accidentes son algo posible. Sin embargo, conforme avance la tecnología involucrada en la fractura hidráulica y la experiencia en su aplicación el riesgo se verá reducido de forma considerable. Las empresas del *fracking* aseguran que emplean técnicas sofisticadas que controlan la propagación de fracturas y la dispersión de los fluidos, explicando que los acuíferos se localizan muchos metros por encima de las formaciones de *shale* y que existen capas impermeables que los aíslan (Prud'Homme, 2014).

Por otro lado, parte del fluido inyectado en el pozo para provocar la fracturación de las formaciones rocosas retornará a la superficie junto con los hidrocarburos extraídos (*flowback fluid*). La cantidad de fluido recuperado oscilará entre el 5 y el 50% de la cantidad total de agua empleada (algunos autores la sitúan entre el 3 y el 80%) y el resto quedará atrapado en el seno de la formación, normalmente infrasaturada en agua. Este fluido ya no se moverá o volverá a la superficie a menos que se desplace por la presión del agua (King, 2012). La gestión del fluido de retorno es crítica para evitar la contaminación de los acuíferos y las aguas superficiales, ya que este líquido puede contener, además, minerales y elementos químicos procedentes de la formación geológica hidrofracturada. En ocasiones, las formaciones de tipo *shale* contienen iones naturales radiactivos como bario, estroncio o bromo que potencialmente pueden ser arrastrados a la superficie por el *flowback fluid* en bajas concentraciones. Sólo cuando se concentran pueden suponer un problema (King, 2012).

Tradicionalmente estos fluidos eran almacenados en fosos excavados en el suelo, tratándose de uno de los elementos más críticos de todo el proceso de fractura hidráulica, puesto que fallos en el almacenaje podría resultar en la liberación de materiales contaminantes en la superficie o en las aguas subterráneas («Hydraulic Fracturing: The Process», 2010). Actualmente, y cuando las condiciones geológicas así lo permiten, los fluidos que retornan a la superficie son vueltos a inyectar en formaciones geológicas profundas, donde quedan retenidos. Además, los avances en el tratamiento del *flowback* han permitido usarlo con otros propósitos, como el reciclado de fluidos para su posterior utilización en nuevos trabajos de fractura hidráulica, ahorrando cantidades considerables de agua («Hydraulic Fracturing: The Process», 2010).

La inyección de los fluidos de retorno en formaciones geológicas profundas para su almacenamiento es el principal proceso inductor de la actividad sísmica relacionada con la fractura hidráulica. Desde 2001, tras el comienzo de las inyecciones de fluidos en pozos, los terremotos mayores iguales a 3.0 en la escala Richter, han aumentado en Estados Unidos en áreas continentales alejadas de los bordes de placa (Preud'Homme, 2014). La USGS asegura que los casos en los que se han producido terremotos durante el proceso de fractura hidráulica son raros, pero que sí pueden producirse al volver a inyectar los fluidos de

flowback en formaciones rocosas profundas. Según esta misma institución, para que se produzcan terremotos inducidos por las actividades relacionadas con la fractura hidráulica han de converger diversos factores, como que el volumen de fluidos inyectados sea considerable, la presencia de fallas lo suficientemente grandes como para producir terremotos registrables o la presencia de vías para que el fluido inyectado a presión llegue hasta estas fallas, entre otros. En cualquier caso, y aunque no se puede descartar completamente la posibilidad, no hay ejemplos claros que relacionen las operaciones de inyección de fluidos con el desencadenamiento de terremotos destructivos.

Más allá de los requisitos de agua fresca, los problemas con la calidad del agua, la gestión de los fluidos de desecho y las complicaciones relacionadas con la sismicidad inducida, la fractura hidráulica lleva asociados otros impactos ambientales y socioeconómicos. Algunos de ellos serán propios de los procesos asociados a la fractura hidráulica, mientras que otros son comunes a cualquier tipo de extracción de gas o petróleo.

Entre los riesgos comunes se encuentran la disminución de la calidad del aire, el ruido, la contaminación lumínica, los cambios en el paisaje, la fragmentación de los bosques o las afecciones a los hábitats. Los efectos logísticos derivados de la extracción de hidrocarburos también serán comunes en la fractura hidráulica y en los pozos convencionales. La construcción de nuevas carreteras que soporten un número de vehículos en aumento, la necesidad de tuberías que transporten los hidrocarburos hasta la red de distribución y la construcción de estructuras de procesamiento serán algunos de ellos. Igual que en la extracción de hidrocarburos convencionales, la fractura hidráulica también requiere de una plataforma para albergar los pozos y el equipo necesario para la perforación. El número de estas plataformas se verá, sin embargo, reducido por la utilización de pozos horizontales, que permiten acceder a una mayor superficie de la formación rocosa a partir de un solo pozo vertical, sin embargo, en este caso, el tamaño de la plataforma será considerablemente mayor.

Por su parte, entre las afecciones ambientales específicas de la fractura hidráulica destacan la reducción en la disponibilidad de agua, la fuga de agentes químicos hacia la superficie, la degradación del agua superficial por la gestión de los fluidos de desecho, la

contaminación de acuíferos, la sismicidad inducida por la inyección del fluido de retorno o los impactos derivados de la extracción de la arena empleada en el proceso de fractura hidráulica. En algunos casos, también será necesaria la construcción de embalses que almacenen los grandes volúmenes de agua necesarios para la fractura hidráulica.

Según el *Energy Institute* (2015) la fractura hidráulica podría suponer riesgos para la seguridad y salud pública. Consideran como el principal peligro la fuga incontrolada de gases por fallos estructurales en el pozo, que podrían llegar a generar explosiones si estas alcanzaran alguna llama. A pesar de que el gas natural es la energía fósil más limpia, ya que emite mucha menos cantidad de CO<sub>2</sub> por unidad de energía liberada que el carbón o el petróleo, y de que algunos defensores de la fractura hidráulica esgriman el argumento de que el gas natural procedente del shale se convertirá en un combustible de transición entre las energías fósiles y las renovables, el metano, principal componente del gas natural, posee un poder de efecto invernadero mucho más potente que el CO<sub>2</sub>, si bien su permanencia en la atmósfera es más breve. La institución antes nombrada advierte que durante los procesos de exploración, producción y transporte pueden producirse emisiones de metano por cuatro causas principales: la descarga intencional por motivos de seguridad y económicos, la quema incompleta, las emisiones por fugas y, finalmente, incidentes relacionados con la ruptura del equipamiento. En cualquier caso, la industria del fracking está trabajando duro en reducir las fugas de metano para mejorar la aceptación pública, sin contar con que estas fugas suponen un perjuicio económico para las compañías.

A todo esto habría que sumar el impacto social que supondría para las pequeñas comunidades la llegada de trabajadores durante un periodo más o menos largo, pero que acabarán por abandonar el lugar, o las consecuencias de soportar las flotas de grandes camiones y los ruidos constantes procedentes de las perforaciones.

### **2.3. LA MINERÍA SOSTENIBLE. PROBLEMÁTICA Y DEBATE**

El intenso rechazo generado por la actividad minera está relacionado, principalmente, con los impactos tan agresivos en el medio natural que se derivan de las labores extractivas. Estas afecciones suponen una transformación, a menudo irreversible, en el medio ambiente y en las formas de vida de las comunidades del entorno. La oposición a la minería se vio

acrecentada en las décadas de los 80 y 90 por la reacción ambientalista que, según Skinner (1994), está relacionada con la falta de educación en materia de minería (Oyarzún y Oyarzun, 2011). Los detractores se basan en la idea de que las labores extractivas afectarán negativamente a la estabilidad física del paisaje y supondrán la destrucción de las formas de vida de las comunidades locales al modificar los usos del suelo, llevar a cabo expropiaciones forzosas o contaminar los terrenos agrícolas. Sin embargo, la minería es de vital importancia para el mantenimiento de las sociedades modernas.

La conjunción de los factores previamente expuestos -por un lado el rechazo al desarrollo de actividades mineras que puedan dañar el paisaje o el medio ambiente y, por otro, la necesidad de sus productos para el mantenimiento del estilo de vida actual- condicionó el surgimiento del movimiento social conocido como NIMBY (*Not in my back yard*). En la práctica, dicha respuesta supuso la suspensión de gran parte de la actividad minera en los países occidentales y su expulsión hacia países subdesarrollados, demasiado preocupados por conseguir beneficios económicos que compensaran sus balanzas económicas como para analizar las consecuencias ambientales y sociales que las labores de mineras acarrearían en su territorio. Estos países, además, suelen carecer de legislaciones efectivas que protejan a las personas y a los ecosistemas afectados por las labores mineras, como sí ocurre en las sociedades desarrolladas. Esta respuesta es un ejemplo evidente de la hipocresía con la que actúan las sociedades más ricas, alejando las actividades no deseadas, aunque necesarias, de sus territorios.

La solución al desafío que plantea la minería no pasa por desterrar esta actividad a lugares del mundo menos desarrollados y con unas leyes medioambientales más laxas, máxime cuando el desarrollo económico de China y otros países en vías de desarrollo está aumentando la competencia en los mercados tradicionales de este tipo de recursos. Occidente tiene que conocer en profundidad los recursos minerales de los que dispone, informar a sus ciudadanos sobre las características de la minería moderna y su importancia en el mantenimiento de las formas de vida, y desarrollar técnicas que minimicen los impactos ambientales derivados de la extracción de esos recursos. En definitiva, debe encaminar esta actividad hacia el paradigma de la sostenibilidad.

### 2.3.1. Desarrollo sostenible

El desarrollo sostenible es un concepto empleado en muchas de las áreas relacionadas con el ser humano (Dubiński, 2013) y sus actividades económicas. Este término se acuñó por primera vez en el año 1987, en el informe *Our Common Future* (también conocido como *Informe Brundtland*), como reacción al crecimiento económico observado en muchos países basado en un uso excesivamente intenso e incontrolado de los recursos naturales. El informe en el que se incluyó por primera vez el término desarrollo sostenible fue el resultado de los estudios de la Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo de las Naciones Unidas, y en él se plantea la idea de lograr un crecimiento económico respetuoso con el patrimonio natural, con el objetivo de mantener los recursos suficientes para el sustento de las generaciones futuras (López-Davadillo Larrea y Martín Roda, 2012). De forma exacta, en este informe se aboga por *“Satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las generaciones futuras para atender sus propias necesidades”* (*Report of the World Commission on Environment and Development*, 1987). La Comisión Mundial también afirmaba que existen dos condiciones básicas para que los intercambios económicos internacionales sean beneficiosos para todas las partes implicadas, especialmente para los países en vías de desarrollo: la sostenibilidad de los ecosistemas explotados y que los intercambios sean equitativos (López-Davadillo Larrea y Martín Roda, 2012). Estos mismos autores afirman que entre los temas tratados por la Comisión se resaltaba el acelerado crecimiento de la población mundial en relación con los recursos existentes en el planeta Tierra.

En la Cumbre de Rio de Janeiro de 1992 se establecieron los 27 Principios del Desarrollo Sostenible. En este documento, los participantes en la cumbre incidían en que se necesitan nuevas formas de invertir en el futuro para alcanzar un desarrollo sostenible pleno en el siglo XXI, fomentando la cooperación entre las diversas naciones con el objetivo de lograr la sostenibilidad de la industria encargada de explotar recursos minerales, así como la creación de nuevas tecnologías para su aprovechamiento.

### 2.3.2. La minería ¿una actividad intrínsecamente insostenible?

Muchos de los detractores de la minería a lo largo de todo el mundo esgrimen que la minería es insostenible por definición («¿Qué es la minería a cielo abierto?», 2016; «Los impactos de la minería», s. f.), ya que afecta a uno de los principios básicos del desarrollo sostenible, el que aboga por la conservación de los recursos para las generaciones futuras. En esencia, la actividad minera se basa en la explotación y el consumo de recursos naturales escasos (D'Esposito, 2000) y no renovables en la escala de tiempo humana.

Por otra parte, la minería es una actividad que consume enormes cantidades de energía y produce un volumen de residuos muy elevado en comparación con el producto económico obtenido (D'Esposito, 2000), sin contar con los graves impactos que, en ocasiones, produce en el medio ambiente, y entre los que se incluye la deforestación, la contaminación de las aguas, la alteración de los regímenes hídricos y la destrucción de hábitats («Los impactos de la minería», s. f.). Este argumento también es empleado por los críticos de la minería, puesto que entra en conflicto en un sentido estricto con el principio de conservación de los ecosistemas explotados, incluido en el *Informe Brundtland*.

A pesar de todo, y en palabras del geógrafo Juan Requejo (2017) *“No podemos abandonar la minería porque desde que dejamos de ser cazadores y recolectores la empleamos y cada vez con mayores usos, por lo que defender que dejemos de practicarla es como defender que dejemos de vivir como lo estamos haciendo”* (EFE, 2017). El ser humano utiliza, al menos, un millar de minerales, así como la combinación de 92 elementos químicos de la tabla periódica para obtener una gran parte de los productos que usamos (Alonso, 2010) diariamente para alimentarnos y vestirnos, así como para la generación de energía eléctrica, la fabricación de aparatos electrónicos o la construcción de medios de transporte, entre muchos otros ejemplos. Por otra parte, algunos recursos minerales y productos derivados, entre los que se incluyen el hierro, el cobre, el vidrio o el plástico («Paneles fotovoltaicos: ¿Cuáles de sus materiales son recuperables?», 2017) e, incluso seis elementos considerados como críticos por la Unión Europea como el neodimio (Nd), praseodimio (Pr), disprosio (Dy), Indio (In), galio (Ga) y silicio (Si) son fundamentales en la fabricación de aerogeneradores eléctricos y de placas fotovoltaicas (Comisión Europea, 2018). La minería, por tanto, jugará un papel

fundamental en la transición energética desde los combustibles fósiles hasta las energías limpias y renovables.

La importancia de la minería en el mantenimiento de las formas de vida en la sociedad actual, así como en la denominada transición energética, hace fundamental que las empresas del sector y las autoridades competentes intenten buscar la mejor forma de incorporar los conceptos ligados al desarrollo sostenible a las actividades extractivas.

### 2.3.3. Elementos de una minería sostenible

Los autores que analizan la relación entre minería y sostenibilidad han propuesto diferentes definiciones de lo que ellos consideran como minería sostenible. Para Alonso (2010) la minería sostenible consistiría en la explotación de yacimientos minerales de forma que se consiga riqueza para las generaciones presentes, conservando el medio ambiente para las futuras generaciones. Este autor considera que para desarrollar sus actividades de forma respetuosa, la minería no puede olvidarse que se inserta en un marco de comunidades poblacionales y que las comunidades, por su parte, deberían ser conscientes de la minería como fuente de riqueza para la región (Alonso, 2010). Oyarzun, Higuera, y Lillo (2011), por su parte, plantean que una vez que se acepta que la minería afecta necesariamente al medio, la sostenibilidad es el concepto que permite dar por buena la afección, es decir aquella que *“afecta al medio de tal forma que se cubran las necesidades humanas, sin que ello suponga la desaparición de las características propias de medio afectado, ni ponga en jaque el bienestar de las futuras generaciones”* (Oyarzun et al., 2011). Para el Departamento de Industria, Innovación y Ciencia del Gobierno de Australia, país donde la minería es una actividad económica muy importante, siendo, además, el líder mundial en minería sostenible, esta consiste en la explotación de los recursos de forma que se maximicen los beneficios económicos y sociales, minimizando los impactos medioambientales, e integrando en todas las fases del proyecto minero aspectos económicos, medioambientales, comunitarios y de seguridad (Department of Industry, Innovation and Science, s. f.). Otros autores afirman que la sostenibilidad en minería se consigue cuando la explotación genera beneficios a largo plazo de tipo ambiental, social y económico (Oyarzún y Oyarzun, 2014).

En cualquier caso, diversos autores coinciden en que la minería sostenible debe sostenerse en tres pilares fundamentales (Dubiński, 2013):

- **Económico:** *mediante actividades técnicas que aseguren el crecimiento económico*, planeando los volúmenes de producción que satisfagan las necesidades de los clientes y desarrollando técnicas que permitan utilizar el producto minero de la manera más eficiente. Se trata de un pilar fundamental de la sostenibilidad en relación con la minería, ya que esta explota varios tipos de recursos naturales no renovables y que, por tanto, son agotables, de modo que los recursos deben ser adquiridos de forma razonable y económica (Dubiński, 2013).
- **Ecológico:** *asegurando la protección de los recursos naturales y el medioambiente*, preservando las reservas a través de una explotación racional que evite su agotamiento. También implica tomar las medidas oportunas que minimicen el impacto negativo de los procesos mineros a los diversos compartimentos que componen el medio ambiente. Para ello, será necesario desarrollar tecnologías que extraigan el mineral de una forma eficiente, minimizando los efectos negativos del proceso minero, y que reparen los impactos que no han podido ser evitados.
- **Social:** *protegiendo la seguridad de los trabajadores de la labor extractiva y de la comunidad en la que se asienta dicha actividad*, asegurando las condiciones de trabajo y la salud de los empleados y considerando, además, los aspectos sociales relacionados con la actividad minera, incluyendo a las familias de los trabajadores, el mantenimiento de las formas de subsistencia de la población local, un tratamiento ético a los habitantes de la región, etc.



Figura 2.10. Los tres pilares de la sostenibilidad. Modificado de Oyarzun, Higuera y Lillo (2011), "Minería Ambiental. Una introducción a los impactos y su remediación".

La sostenibilidad se sitúa donde confluyen los tres pilares previamente descritos (Figura 2.10.) ya que sin el factor económico no existe desarrollo y sin el factor ambiental se destruyen los ecosistemas (Oyarzun et al., 2011), sin embargo, el ser humano tiene que ser también una variable clave en la ecuación de la sostenibilidad.

Uno de los factores fundamentales para la consecución de un mayor grado de sostenibilidad en la industria minera a escala global implica el intercambio de experiencias en los campos de conocimiento, métodos de actuación, tecnologías y otros elementos, entre los diversos actores que se benefician de esta actividad económica (Dubíński, 2013). Por otro lado, sería conveniente mejorar la opinión pública sobre la minería, especialmente la de la población residente en las regiones ricas en este tipo de recursos naturales. En las conclusiones derivadas de la "Quinta Conferencia Anual de Ministros de Minería de las Américas" (CAMMA, 2000) se exponía que las opiniones adversas sobre la minería continúan, a pesar de que es una actividad económica que genera bienestar y que ha tomado conciencia de sus responsabilidades medioambientales, asumiendo las demandas sociales sobre la protección ambiental (Alonso, 2010). Por ello, aconsejaban un acercamiento transparente a la población, informando al público sobre los beneficios e

impactos que esta actividad genera, para minimizar así su imagen negativa y la oposición a la realización de proyectos mineros en sus territorios (Alonso, 2010).

También en España, diversas empresas ligadas al sector extractivo incluyen entre sus objetivos la mejora de la imagen y reputación del sector minero. Así, por ejemplo, en el Plan Estratégico 2012-2015 del Sector de los áridos se incluye esta meta entre los objetivos estratégicos secundarios. Su cumplimiento se pretende lograr mediante el desarrollo de planes de responsabilidad social que consoliden las buenas prácticas en materia de medio ambiente y de prevención de riesgos naturales (ANEFA, 2012).

No en vano, la respuesta ante la implantación de una empresa minera en una determinada área va a estar condicionada por la historia, las costumbres y los modos de vida de las gentes de esa región. Así, en algunas regiones aragonesas de escasa o nula tradición minera, la idea de iniciar una actividad extractiva en su territorio ha generado una fuerte controversia que ha llegado a manifestarse en forma de creación de asociaciones contrarias a la minería. Por ejemplo, a finales de 2018 los vecinos de Bueña (Teruel), localidad sin tradición minera, mostraron su rechazo en una asamblea a la solicitud para investigar un yacimiento de carbón, debido al temor de sus vecinos de que esta actividad destruya sus tierras de cultivo y afecte a la captación de agua y a su principal atractivo turístico, un patrimonio paleontológico único en el mundo (Rajadel y Moreno, 2018). Especialmente agresiva es la oposición a la obtención de hidrocarburos mediante fractura hidráulica. Ejemplos de ello son la Plataforma Antifracking Alto Jalón o la prohibición expresa de varios pueblos del Maestrazgo turolense al uso de esta técnica dentro de sus límites. Opuestas motivaciones son las que han llevado a los habitantes de las cuencas mineras tradicionales a manifestarse en repetidas ocasiones con el objetivo de salvaguardar las actividades extractivas como forma de mantener la vida en el territorio. Estas protestas se han agravado en los primeros meses del año 2019 en las Cuencas Mineras turolenses por el anuncio del Gobierno estatal del cierre de la central térmica de Andorra en junio de 2020 (Alegre Saura, 2019), así como por el cierre de la mina de lignito de Ariño (Castel, 2019).

En los últimos años han surgido nuevos conceptos ligados a la sostenibilidad que podrían ser incorporados a la actividad minera a través de la aplicación de técnicas y metodologías

encaminadas a hacer de esta labor una actividad medioambientalmente más amable. Uno de estos conceptos coincide con lo que se ha denominado ecología industrial, la cual, básicamente, busca imitar en las actividades industriales la forma en la que funciona un ecosistema. De este modo, las fábricas no funcionan de forma independiente, sino que buscan asociarse entre sí, alcanzando una relación de cooperación mutua y minimizando su impacto en el medio ambiente a través de una reducción en la generación de residuos y en la dependencia energética (Arriols, 2018). El concepto de ecología industrial se basa en el hecho de que los residuos industriales de una actividad pueden servir como materia prima de otra, y estos, a su vez, de una tercera (y así sucesivamente), reduciendo de este modo la dependencia de materias primas exteriores.

Otro concepto relacionado con la sostenibilidad de las actividades económicas, especialmente con el tercer pilar que la sostiene, es decir, el relacionado con los factores sociales, es la denominada *Licencia Social para Operar (Social Licence to Operate, SLO)*, que indica el nivel de aceptación y aprobación de las comunidades y de las partes interesadas en la puesta en marcha de un labor industrial. Se basa en la idea de que las compañías y las instituciones no solo precisan de un permiso burocrático para operar en una determinada región, sino que también necesitan un consentimiento expreso de la comunidad para poder desarrollar sus actividades (Learning for sustainability, s. f.). En el contexto minero, la Licencia Social para un proyecto extractivo, incluyendo los planes de exploración, queda condicionada a las creencias, percepciones y opiniones de la población local y otros grupos de interés en relación con la labor minera (Thomson y Boutilier, 2011).

#### 2.3.4. Evaluación de Impacto Ambiental

El nuevo paradigma de la sostenibilidad en los ámbitos mineros ha favorecido la adopción por parte de los responsables políticos de medidas que valoren el impacto territorial, social y ambiental y que regulen la industria extractiva. Las empresas mineras que desean iniciar labores extractivas en un territorio determinado deberán presentar informes que aseguren la viabilidad social y ambiental de dicho proyecto, incluyendo planes de restauración minera. La mayoría de países del mundo exigen una Evaluación del Impacto Ambiental (EIA) antes de la puesta en marcha de un proyecto minero (ELAW, 2010).

La Evaluación de Impacto Ambiental es un estudio realizado para identificar, predecir y prevenir las consecuencias sociales y ambientales que determinadas acciones y proyectos potenciales pueden causar en la salud y el bienestar humano y en el entorno donde se pretende realizarlos (Alonso, 2010). El propósito del proceso de elaboración de los EIAs es informar a los responsables políticos, así como al público general, de las consecuencias ambientales derivadas de un determinado proyecto minero, identificando, prediciendo y analizando los efectos sobre el ambiente físico, social, cultural y los efectos en la salud (ELAW, 2010). Estos informes sirven para que los responsables de la toma de decisiones analicen su viabilidad, además de ser una buena herramienta para promover la transparencia y la participación pública en los proyecto mineros (ELAW, 2010).

El análisis viene realizado por la empresa que pretende poner en marcha el proyecto minero, o por una consultora (Oyarzún y Oyarzun, 2014) y debe incluir, al menos, los siguientes aspectos básicos (Alonso, 2010):

- Identificación de los componentes del medio que pueden verse afectados.
- Predicción de los efectos que la ejecución del proyecto minero supondrían en cada uno de estos componentes.
- Determinación del modo de prevenir los impactos negativos derivados de la ejecución del proyecto.

El gobierno regional o central será el encargado de realizar el análisis de la Evaluación de Impacto Ambiental presentado por la empresa, determinando, finalmente, la aceptabilidad o no del proyecto propuesto (Oyarzún y Oyarzun, 2014).

### 2.3.5. Medidas correctoras para la mitigación de los impactos ambientales derivados de la actividad minera

Si bien algunos impactos relacionados con las labores extractivas son inevitables, la minería moderna deberá analizar, antes de la puesta en marcha de cualquier proyecto, cómo las afecciones al medio ambiente pueden ser minimizadas o restauradas. La mitigación y la corrección de los impactos generados durante el proceso extractivo enlaza con el concepto de minería sostenible, y, como se ha visto, es un aspecto fundamental de los

Impactos de Evaluación Ambiental. La consecución de estos principios necesitará del desarrollo de tecnologías y de la voluntad de las empresas mineras y, en cualquier caso, la minería nunca debería de generar más daños que los beneficios que produce.

Oyarzun, Higuera y Lillo (2011) proponen diferentes formas de reducción de los impactos producidos por la minería en el medio ambiente en función del compartimento del medio que se vería afectado. Así, por ejemplo, incluyen el establecimiento de barreras de sonido de tipo natural y artificial y la optimización de las rutas de tráfico entre los métodos de reducción de los efectos del ruido y las vibraciones. También el procesamiento de los minerales, una vez que han sido extraídos, en ambientes cerrados e insonorizados. Por su parte, para la contención del polvo liberado en los diferentes procesos deberán de ser puestas en marcha técnicas de aspersión de agua y aditivos aglomerantes en las fuentes emisoras, como por ejemplo, en los caminos de tierra.

Por su parte, para el control del drenaje ácido de minas, que como se analizó en el apartado correspondiente es uno de los factores más problemáticos para el medio ambiente derivados de las labores extractivas, se proponen dos conjuntos de actuaciones diferentes, unas de tipo preventivo, que deberán ser adoptadas antes del comienzo de la actividad y otras de carácter correctivo, que serán puestas en marcha una vez que se comprueba que las medidas preventivas no han funcionado correctamente (Aduvire, 2016). Como indica este autor, la forma más adecuada de evitar la generación de este tipo de drenajes es la eliminación de los condicionantes que favorecen su formación, restringiendo el ingreso de agua y oxígeno en los residuos expuestos a la meteorización mediante el empleo de materiales impermeabilizantes, aislando los minerales sulfurosos, o bien, controlando el pH del medio incorporando materiales alcalinos y empleando bactericidas. Como medidas concretas que logren este fin se propone la utilización de métodos de barrera que impidan la mezcla y dilución de los efluentes y reduzcan su carácter ácido (a través de la revegetación de los terrenos y el encapsulado de los materiales reactivos, entre otros) o mediante métodos químicos que mantengan el pH de los efluentes de mina dentro de un rango alcalino (Aduvire, 2016). Si no se ha podido evitar la formación del drenaje ácido de mina, las actuaciones deberán encaminarse a evitar su propagación. Entre las medidas propuestas se incluye la desviación del agua de escorrentía y de las aguas subterráneas para alejarlas de la

fuente de acidez y evitar la infiltración del agua de precipitación sobre la fuente contaminante.

Oyarzun, Higuera y Lillo (2011) determinan como fundamental una buena planificación previa a la ejecución de cualquier proyecto minero, realizando estudios que analicen las características del lugar en el que se emplazará la mina. El conocimiento sobre aspectos como el clima, los parámetros geológicos, la orografía, la sismicidad y la vulnerabilidad ante otros fenómenos geológicos y climáticos serán de vital importancia a la hora de asegurar la seguridad de la mina y sus estructuras auxiliares (balsas y escombreras), de los trabajadores, de la población residente en el entorno de la labor minera y de la fauna silvestre.

Es importante, asimismo, incorporar en estos estudios de planificación elementos socioeconómicos que intenten responder a tres preguntas fundamentales: quién y cuántos conseguirán un empleo, dónde se concentrará la riqueza y qué daño puede producir la labor minera en el entorno, entendiendo este como el medio de subsistencia de la población local (Oyarzun et al., 2011).

En cualquier caso, introducir medidas correctoras que mitiguen los impactos supone un desembolso económico para la empresa encargada de realizar la explotación, la mayoría de las veces de capital privado, y que busca un beneficio económico. La adopción de este tipo de medidas reducirá su margen de ganancia. Como se verá en el Capítulo IV de la tesis, en el que se describe el análisis del interés minero propuesto, un interés bajo no implica que esa ubicación sea descartable para el desarrollo de la labor extractiva, sino que el rendimiento económico del yacimiento asociado será potencialmente menor, bien sea por que presenta unas pobres características geológicas o por la necesidad de incorporar medidas de corrección frente a los impactos.

Cabe destacar que si bien los principios de la sostenibilidad ambiental se van incorporando progresivamente a las actividades mineras, en la actualidad se presentan nuevos retos en relación con los suministros y la disponibilidad de recursos que pueden llevar a reevaluar regional y localmente la conveniencia de su explotación, como se explica en el siguiente apartado.

## 2.4. DESAFÍOS DE LA COMPETENCIA GLOBAL POR EL ACCESO A LOS RECURSOS MINEROS

La función de la minería como sustentadora de las sociedades modernas está fuera de toda duda, pues estas dependen enormemente de los recursos mineros para la generación y la transmisión de energía, la movilidad y el transporte, la comunicación y el intercambio de información, la provisión de alimentos, la atención sanitaria, y un sinnúmero de otros servicios (IIED, 2002). La minería es probablemente la segunda actividad humana más antigua tras la agricultura, y su historia es paralela a la de la humanidad (Hartman y Mutmanský, 2002). No en vano, las diversas eras culturales conocidas por el hombre han sido identificadas con productos o subproductos de esta actividad, como la Edad de Piedra, de Cobre, de Bronce, de Hierro o la Era Atómica. Algunos autores hablan, incluso, de la Era de los *Elementos críticos* (Sánchez y Piquer, 2017).

La importancia de la industria minera poco ha cambiado desde el principio de la civilización, puesto que, junto con la agricultura, continúan proporcionando todos los recursos básicos empleados por la humanidad (Hartman y Mutmanský, 2002). Es por ello por lo que algunos autores le otorgan el sobrenombre de *Madre de las industrias* (Soraire, 2014) e, incluso el famoso físico Max Planck dijo a cuenta de la minería: “*La minería no lo es todo pero sin la minería todo sería nada*” (Dubiński, 2013). Aparte del reciclado de los metales ya extraídos, la única manera con la que cuenta el hombre para proveerse de las minerales, rocas y recursos energéticos necesarios para su supervivencia es a través de la minería (Alonso, 2010).

El objetivo de la minería es suministrar una amplia variedad de recursos naturales utilizados para satisfacer diversas necesidades de los seres humanos (Dubiński, 2013) incluyendo la fabricación de herramientas y utensilios, armamento, ornamentos y decoración, la generación de energía, la construcción, o la fabricación de productos químicos y farmacéuticos, automóviles, aviones y aparatos eléctricos (Dubiński, 2013; Hartman & Mutmanský, 2002), entre muchos otros ejemplos. La lista que incluye los destinos en los que los productos mineros son empleados es prácticamente infinita, puesto que todo lo que no se cultiva, caza o pesca hay que obtenerlo a través de la minería (Oyarzun et al., 2011). Los

elementos minerales, metálicos y energéticos, por lo tanto, son imprescindibles para el funcionamiento de prácticamente todos los sectores económicos en la actualidad, puesto que estos elementos constituyen una materia prima elemental en muchas actividades industriales y de otros sectores como la agricultura o los servicios.

#### 2.4.1. Las bases del conflicto

Como se ha podido comprobar hasta el momento, los minerales, así como otras materias primas, son esenciales para el desarrollo económico de cualquier país. Puesto que los yacimientos importantes son limitados en número y que, a pesar de que algunas naciones cuentan con reservas importantes de varios tipos de estos recursos, ningún país es completamente autosuficiente, la confrontación entre los estados por garantizarse el control de los yacimientos y el acceso a los minerales ha sido la tónica dominante a través de los tiempos. En el origen de muchos de los enfrentamientos bélicos entre Estados acaecidos a lo largo de la historia se encuentra el deseo de apropiación por parte de uno de los contendientes de los recursos naturales existentes en otros territorios, e incluso en la base del colonialismo europeo en África del S. XIX se encontraba la lucha por el acceso al combustible y el control de las materias primas ausentes en el territorio europeo y necesarias para el desarrollo industrial (López-Davadillo Larrea y Martín Roda, 2012).

Baños (2017) advierte de que la competencia global por los recursos minerales conlleva una problemática concreta generadora de tensiones internas e interestatales: son recursos muy escasos, aun existiendo mineralizaciones, la extracción del recurso en los yacimientos es muy costosa (incluyendo la temática medioambiental), están en manos de un país o un grupo pequeño de países, pueden encontrarse en zonas inestables y sometidas a episodios de violencia y los riesgos sanitarios para los trabajadores pueden ser elevados. Este autor afirma que el acceso a buenos yacimientos capaces de proporcionar cantidades significativas de los minerales más valorados es una de las prioridades tanto de los Estados como de las corporaciones multinacionales.

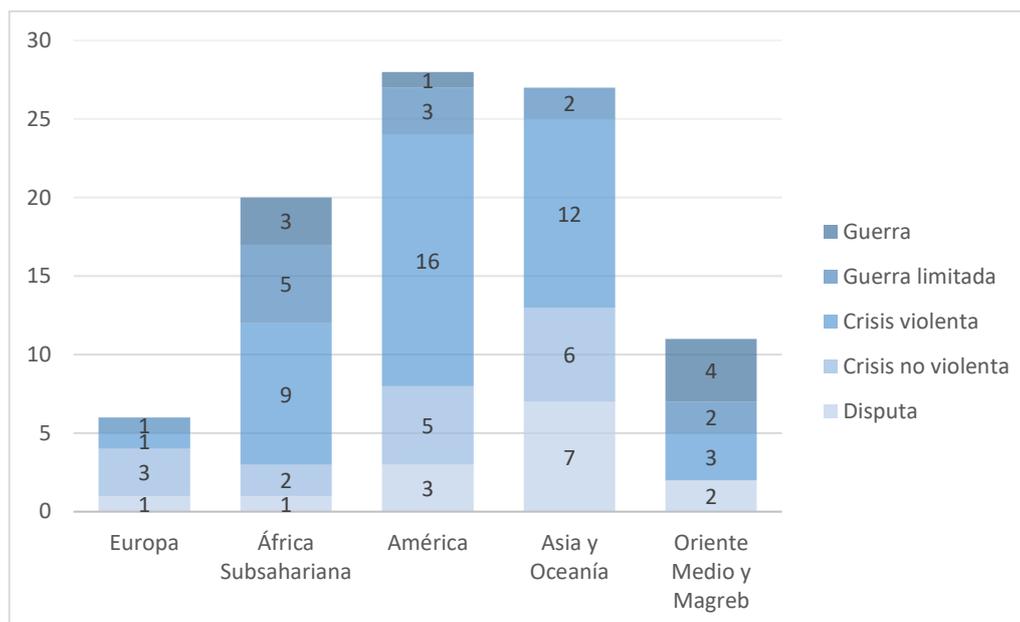


Figura 2.11. Conflictos activos en 2018 relacionados con el control de los recursos, divididos por intensidad y región geográfica. Elaboración propia a partir de los datos del Conflict Barometer 2018, Heidelberg Institute for International Conflict Research (HIIC).

En la actualidad, 92 de los conflictos existentes a nivel global tienen como trasfondo los recursos económicos (Figura 2.11.). La mayoría son de intensidad media o baja, sin embargo, en 2018, 8 conflictos bélicos abiertos están relacionados con el control de los recursos (HIIC, 2019). Aparentemente los conflictos relacionados con el control de los recursos naturales parecen esquivar Europa, así como otros estados del mundo occidental. Todos los enfrentamientos actuales en el continente europeo relacionados con el control de los recursos, con excepción del que confronta a Chipre y Grecia con Turquía por las pretensiones turcas de extraer hidrocarburos en las costas chipriotas (López-Davadillo Larrea y Martín Roda, 2012; Agencia Reuters, 2019), tienen como protagonista a la Federación Rusa. Las únicas regiones con guerras abiertas motivadas por el control de los yacimientos minerales o de hidrocarburos son África y Oriente Medio<sup>3</sup>. Para el geopolítico francés François Thual uno mayores detonantes de conflictos en el África contemporánea es la guerra económica librada por las grandes potencias por el control de las materias primas

<sup>3</sup> El único conflicto considerado por la fuente como guerra en América se corresponde con el enfrentamiento entre el gobierno mexicano y los cárteles de la droga de este país en algunos estados del sur de México (Guerrero, Tamaulipas, Veracruz, etc.).

(Baños, 2017). Sirva como ejemplo el enfrentamiento por el control de las reservas de uranio de Mali entre el ejército francés y grupos terroristas islámicos (Mora, 2013), o las diversas guerras libradas en oriente próximo por el dominio de los hidrocarburos y las conducciones para el transporte de gas y petróleo.

Actualmente, la lucha por los recursos no siempre implica una confrontación armada (López-Davadillo Larrea y Martín Roda, 2012). En el mundo globalizado, es más importante tener relaciones comerciales cordiales con los países que gozan de recursos minerales que poseerlos (Pérez Ventura, 2012). Este autor señala que en numerosas ocasiones ni siquiera el país que los posee explota sus propios yacimientos, sino que son empresas extranjeras, mediante acuerdos con los gobiernos, las que se benefician de recursos que no son propios. Se trata de una nueva forma de “colonialismo” en el que el acceso a los recursos naturales existentes en otros territorios lo realizan grandes corporaciones empresariales, muchas veces de forma conjunta con otras empresas o estados, mediante inversiones económicas. Este tipo de intervención ha reducido los conflictos por el aprovechamiento de los recursos, pero ha sido cuestionada por algunos países, como Venezuela o Bolivia por considerarla una relación de neocolonialismo y subordinación (López-Davadillo Larrea y Martín Roda, 2012). Por otro lado, con la globalización, el incremento de las relaciones internacionales y la evolución de las tecnologías de transporte y comunicación, el paradigma global de vecindad ha sido modificado. Las naciones ya no tienen que competir exclusivamente con sus vecinos geográficos por el acceso a los mercados, sino que cualquier estado, por alejado que esté físicamente de otro, se convierte en un vecino virtual y en un hipotético competidor con el que pugnar por los intereses geopolíticos y económicos (Baños, 2017).

En cualquier caso, el conflicto por el acceso a los recursos minerales continuará aumentando en el futuro, no solo por el desarrollo económico e industrial de nuevas regiones del mundo, sino también por el crecimiento de la población (Dubiński, 2013) y porque los grandes cuerpos mineralizados conocidos se están agotando y cada vez es más difícil encontrar nuevos yacimientos.

### 2.4.2. La República Popular China y la revolución de los mercados

Norteamérica y, sobre todo, la Unión Europea son dependientes de las importaciones para el abastecimiento de las materias primas necesarias en el desarrollo de su industria. No en vano, tradicionalmente Europa, Estados Unidos y Japón han sido los principales destinos de los minerales intercambiados en el mercado global (IIED, 2002). Sin embargo, en las últimas décadas el consumo de minerales se ha incrementado fuertemente, de tal forma que, en lo que va de siglo XXI, han sido empleados más minerales que los que fueron usados durante el resto de la historia de la humanidad (Hartman y Mutmansky, 2002). En la base de este incremento en el uso de los hidrocarburos y los recursos minerales se encuentra el acelerado desarrollo industrial a nivel global, especialmente en el de aquellas naciones que hace no muchos años mostraban un desfase en su desarrollo, como China e India (Baños, 2017), Brasil, Malasia y Tailandia (IIED, 2002).

De todos los ejemplos nombrados, es el desarrollo industrial de la República Popular China, que ha pasado de ser un pequeño exportador de algunos productos minerales (como tungsteno y magnesita) a convertirse en un factor clave en casi todos los mercados de minerales, tanto en volumen de exportaciones como en el de importaciones (Sotomayor, 2018), el que ha supuesto una mayor revolución en la geopolítica de los recursos minerales. China, que desde su transformación en una economía de mercado y su incorporación a los procesos económicos internacionales en la década de los 90 ha experimentado un espectacular crecimiento económico, cuenta con una balanza de pagos saneada y con liquidez abundante como para realizar inversiones en otros países. Sin embargo carece de algunas materias primas como hidrocarburos y algunos minerales, entre los que se encuentran el hierro o el cobre (López-Davadillo Larrea y Martín Roda, 2012). Ambos factores condicionan que la República Popular China esté efectuando inversiones de un modo muy agresivo en algunos de los escenarios de tradicional influencia estadounidense y europea.

Tanto África como América Latina son dos regiones ricas en minerales e hidrocarburos en las que la influencia occidental ha sido dominante históricamente. África produce, aproximadamente un tercio del uranio mundial y es además el primer productor de oro y

diamantes. También cuenta con reservas importantes de níquel, cobre, zinc, plomo, estaño, hierro, bauxita, fosfatos, manganeso, cobalto, fosfatos, petróleo y gas natural (Azcárate Luxán, Azcárate Luxán, y Sánchez Sánchez, 2015). En América Latina, Chile es el país con una mayor importancia minera (mayor productor mundial de cobre, tercero de molibdeno y cuarto de plata), por delante de países como Perú, Brasil, México, Venezuela y Bolivia. Son importantes las reservas de cobre en la cordillera andina y el noroeste mexicano, de hierro en Brasil, Venezuela, México y Perú, de bauxita en el Caribe, Venezuela y Brasil, de estaño en Bolivia y Brasil y de zinc, plomo y plata en México y Perú (Azcárate Luxán et al., 2015).

De este modo, las inversiones chinas en América Latina y el Caribe no han dejado de incrementarse en los últimos años, pasado de menos de 25 millones de dólares americanos en 2006 a más de 225 en 2017 (Dollar, 2018). La República Popular China y Venezuela firmaron diversos acuerdos de cooperación cuyo montante iría destinado a la agricultura, industria y energía a cambio del suministro de combustible al país asiático (López-Davadillo Larrea y Martín Roda, 2012). Además de a Venezuela, las inversiones chinas en esta región del mundo se dirigen a numerosos países, entre los que se incluyen Argentina, Guyana, México, Panamá y Chile. En Perú el montante podría superar los 1.400 millones de dólares, de los cuales 1.100 estarían destinados a la minería, sin embargo, Brasil es el país que recibe una mayor cantidad de divisas procedentes del gigante asiático (López-Davadillo Larrea y Martín Roda, 2012).

Por otro lado, Santiso (2006) destacaba que China era ya el tercer inversor en el África Subsahariana a mediados de la primera década de los 2000, tras Estados Unidos y Francia, lo que se percibe por las potencias occidentales como una amenaza a su hegemonía económica y territorial (López-Davadillo Larrea y Martín Roda, 2012). La creciente influencia de China en África es una preocupación para Estados Unidos y, en las Monografías del CESDEN<sup>4</sup>, se apunta a que también la Unión Europea debería verse inquietada: *“África está emergiendo como un campo de batalla competitivo donde se desarrolla una nueva Guerra Fría con China, esta vez de carácter económico”* (CESEDEN, 2010).

---

<sup>4</sup> Centro Superior de Estudios de la Defensa Nacional

La forma de actuar china en África es ciertamente agresiva. El país, durante los procesos negociadores, sigue la estrategia del *win-win*, en la que las dos partes ganan (Baños, 2017). Este autor pone de ejemplo el caso del presidente sudanés Omar el Bashir, que Pekín mantiene en el poder gracias a su influencia internacional, a pesar de que sobre él pesa una orden de arresto por crímenes de guerra por el conflicto de Darfur. China, por su parte, obtiene acceso a los hidrocarburos y a las tierras cultivables del país. La forma de proceder del país asiático es contraria a la de la Unión Europea que, como se verá más adelante, supedita los acuerdos comerciales relativos al acceso a las materias primas al fomento de los derechos humanos, la gobernanza la resolución de conflictos y la estabilidad regional (Comisión Europea, 2011), China es indiferente a los problemas humanitarios de las naciones en las que realiza sus inversiones, sin imponer condiciones para el establecimiento de relaciones comerciales (López-Davadillo Larrea y Martín Roda, 2012). La falta de implicación china con las condiciones internas de los países en los que invierte menoscaba la capacidad de influencia de las democracias occidentales, sin olvidar los costes sociales y políticos para la población residente en los países en los que realiza sus inversiones (López-Davadillo Larrea y Martín Roda, 2012). Por otra parte, el país asiático cuenta con la ventaja de no generar recelos entre los gobiernos africanos al no haber sido una potencia colonizadora (Baños, 2017).

#### 2.4.3. Minerales estratégicos

Ante este panorama, para los países desarrollados, asegurarse el acceso a los recursos naturales se trata de una prioridad. En cualquier caso, no todos los recursos minerales tendrán la misma importancia para el desarrollo económico de las naciones. De este modo, los diferentes países elaboran listados en los que contemplan una serie de materias primas fundamentales para su desarrollo. Estas materias primas de especial interés son denominadas críticas y/o estratégicas. Ambos términos son similares, pero no absolutamente iguales. Mientras que el término estratégico hace referencia a algo planificado o táctico, crítico define lo que es vital, importante o crucial. Aplicado a los recursos naturales, define aquellos que, en los que existiendo un riesgo importante de que se produzca escasez en su suministro, esta carestía afectaría a la economía en un grado

mayor que la de cualquier otra materia prima. Un mineral crítico puede ser o no estratégico, pero un mineral estratégico será siempre crítico (Regueiro y González Barros, 2014a).

Los recursos naturales considerados críticos y/o estratégicos serán diferentes para cada país e, incluso, para cada época, ya que dependerán de aspectos intrínsecos y extrínsecos a la propia nación. Los materiales necesarios para desarrollar las tecnologías más punteras en cada momento, las reservas *in situ* de minerales con los que el país cuenta en su territorio o la situación política de los países productores de materias primas condicionara la revisión de los recursos de los que la nación deberá abastecerse en el mercado global y la determinación de cuáles de ellos son perentorios para la propia supervivencia. Dependiendo de las circunstancias, su importancia o disponibilidad, cualquier mineral podría ser o convertirse en crítico (Regueiro y González Barros, 2014a) o estratégico.

Baños (2011) define los minerales estratégicos como aquellos que, siendo considerados fundamentales para la defensa y la industria de un país, no es posible extraerlos en su territorio en cantidades suficientes como para satisfacer la demanda interna. Por su parte, Regueiro y González Barros (2014) resalta que el término estratégico se emplea para referirse a recursos que deben de ser planificados o calculados, y para los que es necesario diseñar un plan general de abastecimiento. Desde su origen, el término estratégico asociado a los recursos estuvo ligado al aspecto militar o bélico, pues las potencias definían con él a las reservas de “guerra”, que les permitían proseguir la actividad industrial durante algunos años aún a pesar de un supuesto conflicto bélico que obstaculizara el abastecimiento (Baños, 2011). Actualmente, más que con fines militares, hay que considerar el carácter estratégico de los recursos desde la óptica económica (García Tasich, 2017) y la permanente pugna económica internacional (Baños, 2011).

Para García Tasich (2017) existen tres grandes grupos de recursos naturales susceptibles de ser estratégicos: los relacionados con la seguridad humana (agua, alimentos, tierra y aire), los relacionados con la industria y los relativos al comercio. Los concernientes a la industria y el comercio, conjunto que engloba los recursos energéticos, minerales y farmacéuticos, obtienen su carácter estratégico por ser claves en los modos de producción industrial y esenciales para la prosperidad económica y el bienestar de las personas (García

Tasich, 2017). Un recurso natural será estratégico si cumple una serie de condiciones relativas a su valor de uso y a su disponibilidad (Fornillo, 2014). Para este autor un recurso estratégico tiene que ser clave en el funcionamiento de los modos de producción industrial, en el mantenimiento de la hegemonía regional y mundial o en el despliegue de una economía verde. Respecto a su disponibilidad, tiene que ser escaso, insustituible y estar desigualmente distribuido (Fornillo, 2014). Algunos ejemplos de recursos minerales estratégicos en la actualidad serían el uranio, el cobre, el cobalto, las tierras raras, el litio o los elementos del grupo del platino (Baños, 2011)

Aunque es en la última década cuando los estados han hecho un mayor esfuerzo por estudiar que materiales son indispensables y asegurarse el acceso a ellos, el término “estratégico” para caracterizar a los minerales se acuña tras la Primera Guerra Mundial, cuando el conflicto entorpeció el comercio de materias primas y disparó los precios (García Tasich, 2017). Estados Unidos fue la primera nación occidental preocupada por el suministro estratégico de minerales (Regueiro y González Barros, 2014b) tomando diversas medidas desde la promulgación de la Ley de los Minerales Estratégicos de 1939 para la acumulación de minerales metálicos. Dicha Ley fue modificada en 1946, tras la Segunda Guerra Mundial, con el fin de liquidar las reservas menos relevantes y volvió a ser reformada en 1979, para asegurar que los stocks de recursos fueran los necesarios para sobrevivir en conflictos de hasta 3 años de duración. Más recientemente, en 2005, la Ley de Almacenamiento de los Materiales Críticos y Estratégicos los define aquellos elementos que no se encontraban o no se producía una cantidad suficiente en el país pero que durante una emergencia nacional serían necesarios para cubrir las necesidades de la industria, el ejército y la población civil estadounidense (Regueiro y González Barros, 2014b).

No fue hasta la primera década de los años 2000 cuando Europa comienza a preocuparse por el suministro de recursos minerales, debido al acelerado desarrollo industrial a nivel mundial, y especialmente el acceso de China e India a los mercados globales que exige cada vez más recursos naturales de todo tipo (Baños, 2011). Por su parte, más allá de los informes elaborados por la Unión Europea, España, de forma individual, no ha realizado hasta la fecha ningún tipo de estudio relacionado con la temática de los recursos naturales vitales para la industria y la seguridad de la nación. No obstante, sería conveniente analizar los recursos

naturales estratégicos que son cruciales para las industrias españolas (Regueiro y González-Barros, 2014), y por ello, el Instituto Español de Estudios Estratégicos (IEEE) pretende iniciar un proyecto que determine el valor estratégico de los recursos naturales en nuestro país (García Tasich, 2017).

#### 2.4.4. Elementos críticos para la Unión Europea

En 2008, la Unión Europea, tras venir observando desde el año 2002 síntomas de aumento de volatilidad de los mercados y oscilaciones de los precios, así como una serie de cambios en los patrones globales de la oferta y la demanda de materias primas, marcados por un fuerte aumento en la demanda fruto del crecimiento económico mundial (Comisión Europea, 2011), y consciente de la importancia de definir políticas referentes a garantizar el acceso a los recursos, lanzó la Iniciativa de las Materias Primas. Esta iniciativa estableció una estrategia integrada cuyo objetivo consistía en dar respuesta a los retos que plantea el acceso a las materias primas no energéticas y no agrícolas, basándose en tres pilares fundamentales (Comisión Europea, 2017a):

- Garantizar condiciones equitativas de acceso a los recursos en terceros países.
- Intensificar el abastecimiento de materias primas desde fuentes internas europeas.
- Potenciar la eficiencia de los recursos y fomentar el reciclado.

Además, entre las orientaciones futuras que plantea el primer informe de la Iniciativa de Materias Primas, publicado en el año 2011 se propone la ejecución activa de lo que denomina “diplomacia de materias primas” encaminada a garantizar el acceso a los recursos, especialmente a los fundamentales, estableciendo asociaciones estratégicas y diálogos políticos con los países productores, siguiendo una política de desarrollo y aprovisionamiento sostenible de materias primas y fomentando los derechos humanos, la gobernanza, la resolución de conflictos y la estabilidad regional (Comisión Europea, 2011).

Una de las principales acciones de la Iniciativa de Materias Primas fue el establecimiento de una lista de materias primas críticas para la propia Unión Europea. Su finalidad es determinar los recursos de gran importancia económica para la industria europea y sus cadenas de valor que presentaran un riesgo elevado de escasez en su suministro (Comisión

Europea, 2017a). El objetivo era la creación de una herramienta para la planificación estratégica de la industria, el comercio y la innovación, destinada a reforzar la competitividad industrial europea:

- Identificando necesidades de inversión para reducir la dependencia europea respecto a las importaciones de materias primas.
- Orientando el apoyo a la innovación en el ámbito del suministro de materias primas.
- Resaltando la importancia de las materias primas fundamentales para la transición a una economía verde y más circular.

La UE espera conseguir que esta lista ayude a incentivar la producción europea de materias primas fundamentales mediante el aumento de las actividades de reciclaje y la puesta en marcha de nuevas actividades extractivas cuando sea necesario, a estudiar el mejor modo de asegurarse el acceso a las diferentes materias primas mediante la diversificación de las fuentes geográficas suministradoras, así como conseguir que sea un apoyo en negociaciones, acuerdos comerciales, etc. (Comisión Europea, 2017a).

En la primera lista de materias primas críticas (publicada en 2011) se consideraban como fundamentales para la UE 14 recursos diferentes. En esta publicación la Comisión se comprometía a revisar y actualizar la lista, al menos, cada 3 años, con el objetivo de ampliar el ámbito de las materias primas analizadas y afinar el análisis empleando datos adicionales (Comisión Europea, 2014a), así como considerar la evolución tecnológica de los mercados y de la producción (Comisión Europea, 2017a). El número de materias primas catalogadas como críticas ha ido aumentando progresivamente en cada publicación, pasando a 20 en 2014. La lista de 2017 incluye 7 materiales más que la de 2014, llegando hasta 27 materias primas que ahora son consideradas como críticas (Comisión Europea, 2019). El número de elementos analizados también crece en cada evaluación, superando los 60 en la última.

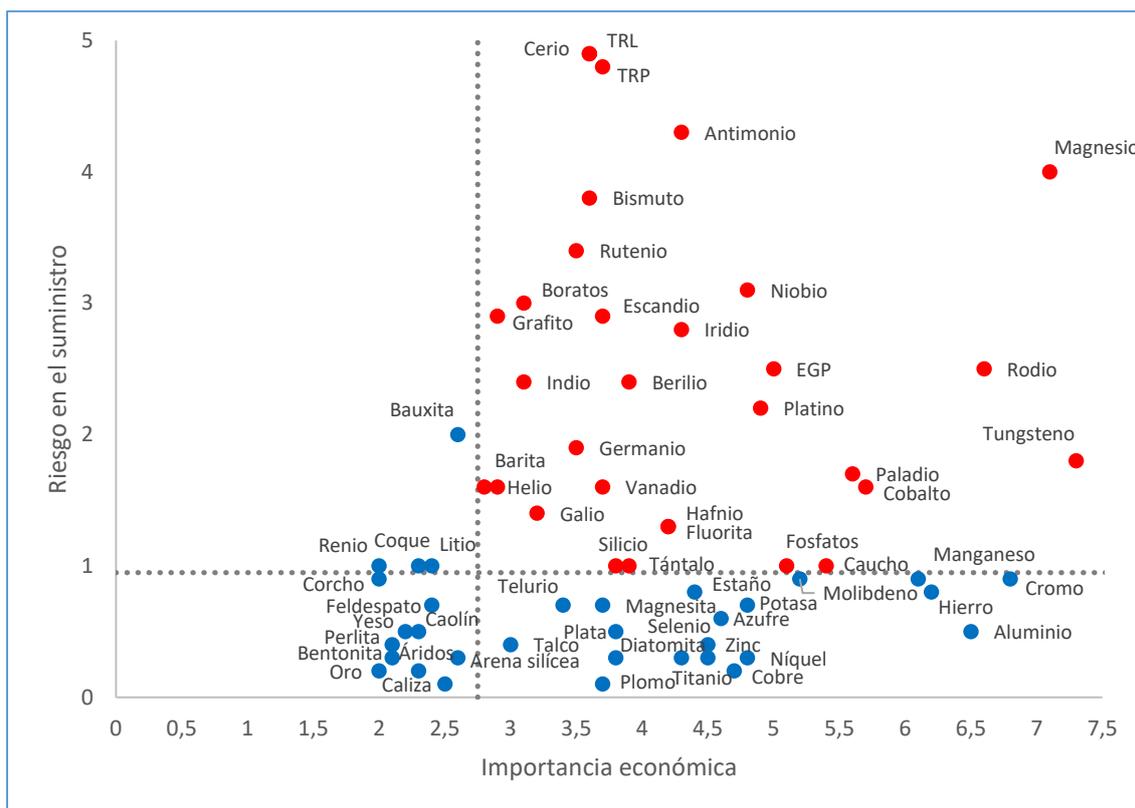


Figura 2.12. Resultados de la evaluación de importancia económica y riesgo en el suministro de 2017. Elaboración propia a partir de datos de la Unión Europea.

La Unión Europea considera como críticas o fundamentales aquellas materias primas que presentan un alto riesgo de escasez de abastecimiento para los próximos años y son particularmente importantes en la cadena de valor. Para determinar la criticidad de las materias primas se valoran dos parámetros fundamentales:

- **Importancia Económica:** Evalúa la importancia del elemento en la economía de la Unión Europea en función de sus aplicaciones finales y el valor añadido que aportan al sector manufacturero europeo. Este valor es corregido por un factor que pondera la dificultad técnica y económica para ser sustituidos por otros materiales en las aplicaciones industriales. En cualquier caso, que una sustancia tenga un valor bajo en este parámetro no significa que no sea importante para la industria europea, sino que en caso de restricciones, su escasez afectaría a una parte menor de la cadena de producción industrial. Sin embargo, incluso en el caso de los minerales de baja importancia económica, su ausencia causaría graves problemas a los sectores industriales europeos que las emplean.

- **Riesgo en el Suministro:** Valora el riesgo de que se produzcan interrupciones en el suministro desde fuentes externas a la propia Unión Europea. Se basa principalmente en la determinación de si la producción de cada elemento se encuentra o no concentrada en unos pocos países, verificando, además, la estabilidad político-económica de esos países y los parámetros comerciales del producto. Su capacidad para ser sustituido en los procesos industriales y su reciclabilidad son factores reductores del riesgo (Comisión Europea, 2017a).

La UE no realiza un ranking que categoriza los materiales fundamentales en función de su condición crítica (Unión Europea 2017), sino que se considerarán como críticas todas aquellas materias primas que rebasen los umbrales establecidos para cada una de las dos categorías analizadas, es decir, Importancia Económica y Riesgo en el Suministro (Figura 2.12.).

Como se adelantaba en párrafos anteriores, en la última revisión, publicada en 2017, la lista contiene 27 materias primas (Tabla 2.1.) catalogadas como críticas por la Comisión (Comisión Europea, 2019). Barita, bismuto, hafnio, helio, goma natural, fósforo, escandio, tántalo y vanadio son las novedades en esta lista con respecto a la de 2014.

*Tabla 2.1. Lista de materias primas consideradas críticas por la Unión Europea (2017). Elaboración propia.*

Materias Primas Críticas (2017)			
Antimonio	Coque	Germanio	Silicio
Barita	E.G. Platino	Grafito natural	Tántalo
Berilio	Escandio	Hafnio	Tierras Raras Ligeras
Bismuto	Fluorita	Helio	Tierras Raras Pesadas
Boratos	Fosfatos	Indio	Tungsteno
Caucho	Fósforo	Magnesio	Vanadio
Cobalto	Galio	Niobio	

Los materiales que se han definido como críticos son cruciales para la economía de la Unión Europea, al conformar la base de amplios sectores de su industria, tener aplicaciones en el día a día de sus ciudadanos y en las tecnologías modernas. Por otro lado, el uso de este tipo de materiales está muy ligado a las energías limpias. Ciertos elementos catalogados como críticos por la Comisión son irremplazables en paneles solares, aerogeneradores o vehículos eléctricos (Comisión Europea, 2019).

Durante la revisión de las fuentes contenedoras de información sobre los recursos minerales de Aragón se encontraron menciones relativas a indicios, antiguas explotaciones y derechos mineros vigentes de 8 de las 27 materias críticas para la Unión Europea. A continuación se expondrán las principales características de estos ocho minerales y elementos, considerando sus aplicaciones en la industria y aportando datos sobre la dependencia europea del recurso.

- **Antimonio.** Según datos del *Study on the review of the list of Critical Raw Materials: Critical Raw Materials Factsheets* (Comisión Europea, 2017c), el antimonio es un elemento semimetálico que en su forma elemental es un sólido cristalino, fundible, quebradizo y de color plateado. El antimonio puede encontrarse en más de 100 especies minerales, normalmente asociado con mercurio, plata y oro, si bien la principal mena de antimonio es la estibina ( $Sb_2S_3$ ). Sus principales usos a nivel global se corresponden con la fabricación de materiales ignífugos, baterías, plásticos, vidrios y cerámicas.

Los principales productores de este elemento son China, Rusia y Bolivia, que concentran más del 80% de la producción mundial. Dentro de la UE se conocen depósitos de antimonio en Francia, Alemania, Suecia, Finlandia, Eslovaquia y Grecia, si bien, estas reservas están basadas en estimaciones históricas que presentan poco interés económico en la actualidad. La dependencia europea del antimonio procedente del mercado global es del 100%.

- La **barita** es un mineral natural cuya fórmula química es  $BaSO_4$ . Presenta una alta densidad y un punto de fusión elevado. La principal utilidad de la barita es su uso como agente densificante en los fluidos utilizados en los pozos de extracción de gas y petróleo, donde sus propiedades consiguen mantener la presión previniendo los reventones en el pozo. La barita también se emplea en la fabricación de goma, pinturas y plásticos, así como en la preparación de varios tipos de compuestos como el carbonato de bario ( $BaCO_3$ ), que tiene diversas aplicaciones en la industria (Comisión Europea, 2017c). Los principales productores mundiales de barita son China, India, Marruecos, Estados Unidos y Kazajstán, si bien existen importantes reservas, además, en otros países como Turquía, Irán o Marruecos. Europa produce

solamente el 20% de la barita que consume, por lo que la dependencia de los mercados extranjeros es muy elevada.

- **Cobalto:** Según datos del *Study on the review of the list of Critical Raw Materials: Critical Raw Materials Factsheets*, el cobalto, Co, es un metal ferromagnético, de color azul plateado. Se encuentra formando parte de minerales como la cobaltita, escuterudita o eritrina. Hannis y Bide (2009) determinan que el cobalto puede ser encontrado en concentraciones económicas en cuatro tipos de yacimientos diferentes: en depósitos sedimentarios, en depósitos hidrotermales y volcanogénicos, en depósitos magmáticos y en lateritas.

El cobalto es empleado en la fabricación de baterías, distintos tipos de aleaciones, cerámicas, pigmentos, imanes, etc., así como catalizador en procesos industriales. Entre los mayores productores de cobalto refinado se encuentran países de la Unión Europea como Finlandia (segundo productor mundial) o Bélgica. No obstante, el mayor productor global de este producto, con el 42% del total, es China. Europa importa solo el 32% de su consumo total de cobalto.

- El **espato flúor o fluorita** es un mineral del grupo de los halogenuros, formado por la combinación de calcio y flúor ( $\text{CaF}_2$ ). Dependiendo de la cantidad de impurezas que alberga en su estructura, la fluorita puede ser transparente u opaca, y sus colores varían dentro de un amplio espectro. El espato flúor aparece principalmente rellenando venas de rocas que han sido expuestas a actividad hidrotermal. También puede ser encontrado en fracturas de calizas y dolomías (Comisión Europea, 2017c).

Los usos finales del espato flúor en la UE incluyen la producción de acero y aluminio, su empleo en productos de refrigeración y aires acondicionados y la fabricación de fluoropolímeros. Un 30% de todo el espato flúor que consumen los países europeos procede de territorios de la propia Unión. España es el mayor productor de este mineral dentro de la UE, aportando un 13% del espato flúor empleado en la industria europea. Según el volumen de producción total, China vuelve a ser el país que aporta una mayor producción de espato flúor a las estadísticas globales, seguida, a mucha distancia, por México, Mongolia y Sudáfrica, si bien, es el país latinoamericano el principal suministrador de este elemento a los países europeos.

- **Fósforo:** Las rocas fosfatadas son la principal fuente de fósforo en la corteza terrestre, un elemento que juega un papel trascendental en los procesos bioeconómicos mundiales. El fósforo es vital para la vida en el planeta, incluidas las plantas, los animales y los seres humanos. Gran parte de la producción de fosfatos se destina a la fabricación de fertilizantes y la alimentación de animales (Comisión Europea, 2017c). El auge en la demanda global de alimentos, derivada del crecimiento de la población, está haciendo aumentar el consumo de este elemento. Además, se emplea en un amplio rango de aplicaciones industriales, incluyendo el tratamiento de aguas, la fabricación de aparatos electrónicos y baterías, lubricantes y material médico.

El principal productor mundial de fosfatos vuelve a ser China, seguido por los Estados Unidos, Marruecos, Rusia y Perú. Europa importa el 100% de los fosfatos que consume, siendo Marruecos su principal proveedor.

- El **grafito natural**, un polimorfo del carbono, es un mineral blando, de color gris o negro metálico. El principal mercado del grafito a nivel global es la producción de materiales refractarios, empleados en la industria del acero y en el proceso de fundición de otros metales. El grafito natural también es necesario en la fabricación de baterías para vehículos eléctricos aparatos electrónicos, además de en la producción de lubricantes y de lapiceros.

Europa es fuertemente dependiente del mercado global de grafito, puesto que importa el 99% del total consumido. China es el principal país exportador de grafito a los países de la Unión Europea, seguida por Brasil, Noruega, Ucrania y Canadá. Por otra parte, Turquía es el país que cuenta con unas mayores reservas globales de este mineral.

- El **magnesio** es un elemento relativamente abundante en la corteza terrestre. No aparece en forma de metal nativo en la naturaleza, si no que se encuentra formando parte de diferentes minerales, como la dolomía, la magnesita o la carnalita. Este elemento se comercializa como metal puro o formando aleaciones, y su uso está relacionado con la industria del acero, del automóvil o la fabricación de equipamiento para la construcción, entre otros usos.

China, vuelve a ser el mayor productor mundial, seguido muy de lejos por los Estados Unidos, Israel, Kazajstán y Rusia. El país asiático es también el mayor exportador de magnesio a la Unión Europea, la cual importa todo el magnesio que su industria utiliza.

- El **silicio** es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre y aparece en forma de minerales silicatados. Este elemento se emplea en la industria química, concretamente en la producción de siliconas y silicio sintético, en las aleaciones de aluminio, en la fabricación de placas solares y en la producción de artefactos electrónicos, explosivos y cerámica, entre otros productos.

La demanda europea de este elemento desde fuentes extranjeras supone un 64% del consumido, y procede, principalmente de países como Noruega, Brasil y China, entre otros. España produce el 9% de la sílice consumida por los países de la Unión.

#### 2.4.5. La geopolítica de los hidrocarburos: el caso del *fracking*

Si bien la existencia del petróleo era conocida desde hace siglos, no fue hasta finales del siglo XIX y principios del XX cuando comenzó a ser utilizado como fuente de energía. La expansión de su uso determinó de un modo espectacular las vicisitudes sociales, políticas y económicas del siglo XX (Heinberg, 2006). En la denominada Era del Petróleo (Bronstein, 2008) el dinamismo económico de los países desarrollados se ha basado en la utilización de hidrocarburos, principalmente de petróleo y gas natural. No en vano, este autor destaca que alrededor del 35% de la energía total consumida y el 90% de la utilizada en transportes procede de los hidrocarburos. Pero los hidrocarburos no solo se emplean en las sociedades modernas como fuente de energía, tanto en la producción de electricidad como refinados en forma de diversos tipos de combustible, sino también como materia prima de muchos procesos industriales. Entre estos últimos se incluyen todos los plásticos, derivados del petróleo, los fertilizantes y pesticidas fabricados sobre la base de los hidrocarburos, o incluso como base para la industria farmacéutica.

A raíz de lo analizado hasta el momento puede entenderse por qué los hidrocarburos en general, y el petróleo en particular, se han convertido en elementos claves no sólo en los procesos medioambientales, sino también en las relaciones económicas internacionales y un

factor sobre el que pivota el juego geopolítico global (López-Davadillo Larrea y Martín Roda, 2012). Lo importante es controlar de manera directa o indirecta las fuentes de energía, ya que quien tiene el control sobre la energía, tiene la capacidad de mover el mundo (Baños, 2019). Dos ejemplos históricos justifican esta afirmación. El episodio geopolítico más importante en relación con la geopolítica de los hidrocarburos fue la denominada Crisis del Petróleo de 1973. En ese año los 12 países que componían la OPEP<sup>5</sup> decidieron limitar la exportación de petróleo árabe a Estados Unidos y otros países occidentales como respuesta a la decisión del presidente norteamericano Nixon de retirar a los Estados Unidos del patrón oro como referente cambiario, violando los acuerdos de Breton Woods y, principalmente, por el apoyo de estos países a Israel durante la guerra del Yom Kipur, que enfrentó al país hebreo con Egipto (Amadeo, 2019). El precio del barril de crudo se cuadruplicó, manteniéndose los precios elevados incluso después de que el embargo terminara (Figura 2.13.). En una época en la que las alternativas al petróleo eran todavía más escasas que en la actualidad quedó patente como este recurso poseía la capacidad de alterar las relaciones comerciales, políticas y económicas internacionales. Como consecuencia del aumento del precio del barril de crudo, el bloque occidental tuvo que enfrentarse a una importante recesión económica, la reducción de la producción industrial y el aumento del paro, lo que acarrió consecuencias políticas internas muy importantes para muchos países europeos (López-Davadillo Larrea y Martín Roda, 2012). No obstante, los elevados precios del crudo permitieron el desarrollo de la industria petrolífera de algunas naciones ajenas a la OPEP, como el Reino Unido, que gracias a las inversiones en los yacimientos del Mar del Norte logró convertirse en un país exportador de hidrocarburos (Terry Macalister, 2011).

Otro evento, más reciente aunque de menor relevancia a nivel global, coincide con las tiranteces entre Rusia y Ucrania por el precio del gas que Kiev pagaba a Moscú y que acabaron desencadenando el corte del suministro en varias ocasiones en las que la tensión entre ambos países fue máxima, en un intervalo de tiempo comprendido entre 2006 y 2009. Los gasoductos que cruzan Ucrania abastecen de gas siberiano a los países orientales de la Unión Europea, entre ellos Alemania, de modo que durante el corte de 2009 estas naciones se quedaron sin suministro de gas durante casi 15 días, con el consiguiente perjuicio para su

---

<sup>5</sup> Organización de los Países Exportadores de Petróleo

industria. Este episodio demuestra que la dependencia europea del gas ruso se ha convertido en un factor de debilidad geopolítica para la Unión Europea, que se vio involucrada en un conflicto bilateral entre Rusia y Ucrania (López-Davadillo Larrea y Martín Roda, 2012).

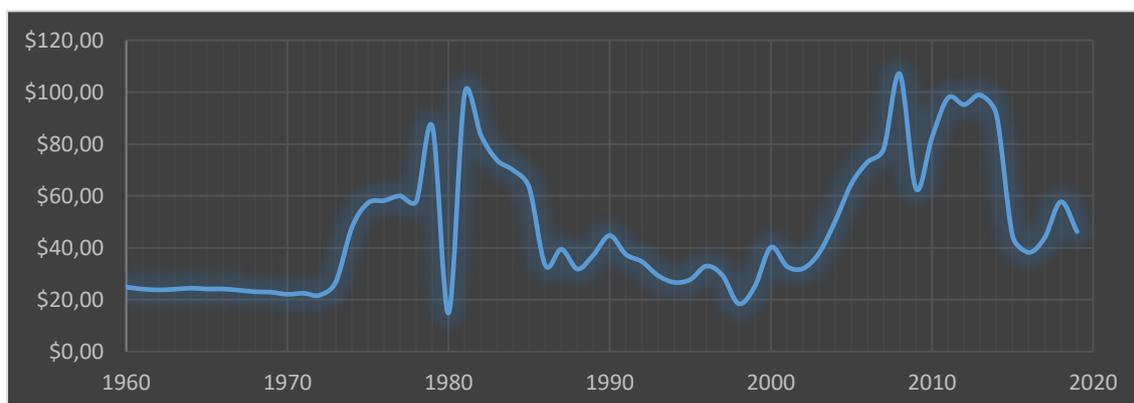


Figura 2.13. Evolución de los precios del petróleo con la inflación ajustada a valores de febrero de 2019. Elaboración propia a partir de los datos de la web [InflationData.com](http://InflationData.com) (2019).

Una de las revoluciones más importantes relacionadas con los hidrocarburos es la que se está desarrollando desde hace poco más de una década en algunas áreas de los Estados Unidos, como Dakota del Norte y Texas. La tendencia al alza de los precios durante la primera década de los años 2000 (Figura 2.13.) hizo rentable el desarrollo del *fracking*, convirtiendo a Estados Unidos en el primer productor de gas del mundo ya en 2014 (Blasco, 2014). Según los datos de este autor, a finales de 2013 la producción de petróleo estadounidense superó por primera vez desde hace mucho tiempo a las importaciones, destacando que, de continuar así, el país norteamericano alcanzaría la independencia energética para el año 2035.

Estados Unidos, único lugar del mundo donde el *fracking* se ha venido realizando a gran escala, ha podido beneficiarse en las últimas décadas de las ventajas comerciales y estratégicas que le ha otorgado el hecho de dejar de ser un país importador de hidrocarburos, colocándolo en una posición privilegiada. En un plano socioeconómico, las empresas dedicadas a este sector crean una gran cantidad de empleos y ha generado grandes beneficios por impuestos al gobierno nacional y a la administración local. El superávit de gas americano después del *boom del fracking*, ha dado un vuelco a la economía estadounidense. Por ejemplo, el descenso en el precio de este hidrocarburo ha supuesto el

renacer de la manufactura americana e importantes beneficios para la industria petroquímica. La población civil y la pequeña empresa también se han visto beneficiadas por el descenso del precio de los hidrocarburos, al verse reducida la factura doméstica de gas y electricidad. No obstante, la repercusión más importante del *boom del fracking* es de carácter geopolítico, debido a la presumible reducción del interés estratégico del país norteamericano en Oriente Medio y a la posibilidad que se le presenta a Estados Unidos de ayudar a la Unión Europea a reducir su dependencia de los hidrocarburos rusos (Blasco, 2014).

Sin embargo, además de los riesgos medioambientales que conlleva su puesta en práctica, ya analizados en apartados anteriores, la fractura hidráulica cuenta con una gran desventaja con respecto a los pozos de hidrocarburos tradicionales. La extracción de un barril de crudo de shale es mucho más cara que la de uno de petróleo convencional –entre 50 y 70 dólares frente a los apenas de 4 a 6 dólares de un barril de petróleo convencional en Arabia Saudí (Page, 2014)-, lo que reduce infinitamente el margen de beneficio. Para que la explotación de hidrocarburos no convencionales mediante esta técnica sea económicamente rentable necesita que el barril de crudo se mantenga en un precio elevado en el mercado global. Como puede ser observado en la Figura 2.13, tras alcanzar un máximo histórico en el año 2008, los precios del barril de petróleo cayeron bruscamente en el año siguiente. Algunos autores consideran que Arabia Saudí, el país con unas mayores reservas de petróleo convencional y la única nación con capacidad real de controlar los precios del crudo a nivel mundial, se encontraba detrás de esta repentina bajada de los precios, castigando así no solo a sus rivales por el liderazgo geopolítico en Oriente Medio sino también a Estados Unidos y su creciente protagonismo en el escenario petrolero mundial debido al *boom* de los hidrocarburos no convencionales (Page, 2014). A pesar de la eventual bajada del precio de los hidrocarburos que caracterizó el final de la década de los años 2000, la producción de hidrocarburos en Estados Unidos no dejó de aumentar, con un crecimiento cercano al 40% en el periodo comprendido entre 2010 y 2018 y una producción que supera en la actualidad los 10,7 millones de barriles por día (Sánchez de la Cruz, 2019).

En cualquier caso, solo el tiempo permitirá conocer la evolución de esta técnica en los Estados Unidos y su posible exportación a otros territorios. Sin embargo, las características

geológicas y socioeconómicas que han permitido desarrollarla con éxito en el país norteamericano no parecen repetirse en una Europa más densamente poblada y concienciada con los asuntos medioambientales, y donde, al contrario de lo que ocurre en Estados Unidos, los propietarios privados de los terrenos donde se desarrollaría esta actividad no tienen derechos sobre los recursos minerales, el petróleo y el gas (Gilblom y Patel, 2016). No en vano, esta técnica ha sido prohibida en varios países europeos como Francia, Alemania, República Checa, Austria y Bulgaria, así como en Gales y Escocia (Gilblom y Patel, 2016). En España, algunas regiones, entre las que se encuentran País Vasco y Castilla-La Mancha, han impuesto unos requisitos de protección medioambiental tan estrictos que hacen prácticamente imposible para los operadores la puesta en marcha de cualquier actividad relacionada con la fractura hidráulica (Planelles, 2017).

## 2.5. IMPLICACIONES METODOLÓGICAS PARA LA TESIS

Todo lo expuesto hasta el momento justifica la necesidad de analizar el interés minero de los yacimientos e indicios minerales presentes en la Comunidad Autónoma de Aragón a través de un análisis multicriterio que incorpore las diferentes dimensiones que componen la actividad minera y los yacimientos minerales. El análisis propuesto, que será descrito en profundidad en el cuarto capítulo de la tesis, se basa en el estudio de tres de las caras fundamentales que conforman el complejo prisma de la minería. Estas dimensiones intentan dar respuesta a tres preguntas que se desprenden del repaso teórico plasmado en este capítulo:

- ¿Presenta el yacimiento un interés económico y estratégico suficiente?
- ¿Cómo se adecúa el territorio a la actividad minera y cuál será su respuesta ante los impactos generados por las labores extractiva? ¿Serán necesarias medidas correctoras?
- ¿En qué grado se verán afectados por la actividad minera los diferentes compartimentos del medio natural y humano?

Las respuestas a estas preguntas se obtendrán a partir de los resultados del estudio obtenidos para las dimensiones denominadas, respectivamente, perfil geológico, aptitud del terreno e inserción socioeconómica. Cada una de las dimensiones analizadas engloba un

conjunto de indicadores basados en los métodos de Evaluación de Impactos Ambientales, incorporando los principios de los tres pilares básicos de la minería sostenible que, recordemos, son: el desarrollo económico, la protección del medioambiente y el respeto por el ser humano y las comunidades locales del entorno de la mina.

En definitiva, el análisis efectuado en esta tesis busca determinar si, considerando las características geológicas y económicas del yacimiento, las peculiaridades del medio donde se ubica y los impactos generados en el medio natural y social, es una buena idea iniciar o continuar una labor minera ligada al yacimiento, dando por válida la perturbación producida en el medio natural y humano.

Para el cumplimiento de los objetivos planteados al comienzo de la tesis, así como para lograr dar respuesta a las tres preguntas planteadas en relación con el interés minero de los recursos aragoneses, será necesario seguir una secuencia metodológica muy concreta, consistente en cinco fases principales, y cuyo modelo esquemático se muestra en la Figura 2.14. A continuación serán descritas, en orden cronológico, las diferentes fases de trabajo a desarrollar, incluyendo las actividades que se efectuarán en cada una de ellas.

#### *Fase 1. Establecimiento de los fundamentos teóricos y metodológicos para el análisis de los recursos minerales y aguas de Aragón.*

El proceso de trabajo seguido para la elaboración de esta tesis comenzará con la revisión bibliográfica pertinente, con el objetivo de asentar los fundamentos teóricos necesarios en la elaboración de una base de datos robusta que almacene los recursos geológicos presentes en la base de datos, incorporando las labores mineras que se desarrollan, o se han desarrollado, en el territorio aragonés, así como los yacimientos e indicios de mineralizaciones que han sido descritos en la región.

#### *Fase 2. Recolección de información y generación de la base de datos.*

La segunda fase de la tesis consistirá en la planificación y construcción de la base de datos que incorpore como registros los recursos minerales presentes en la comunidad, así como la localización de los afloramientos donde se tomaron las muestras de las unidades geológicas susceptibles de actuar como rocas madre generadoras de hidrocarburos. Al proceder de

fuentes diversas, los registros correspondientes a minas, canteras, yacimientos, indicios y depósitos minerales deberán de ser sometidos a un proceso de homogeneización antes de ser introducidos en la base de datos.

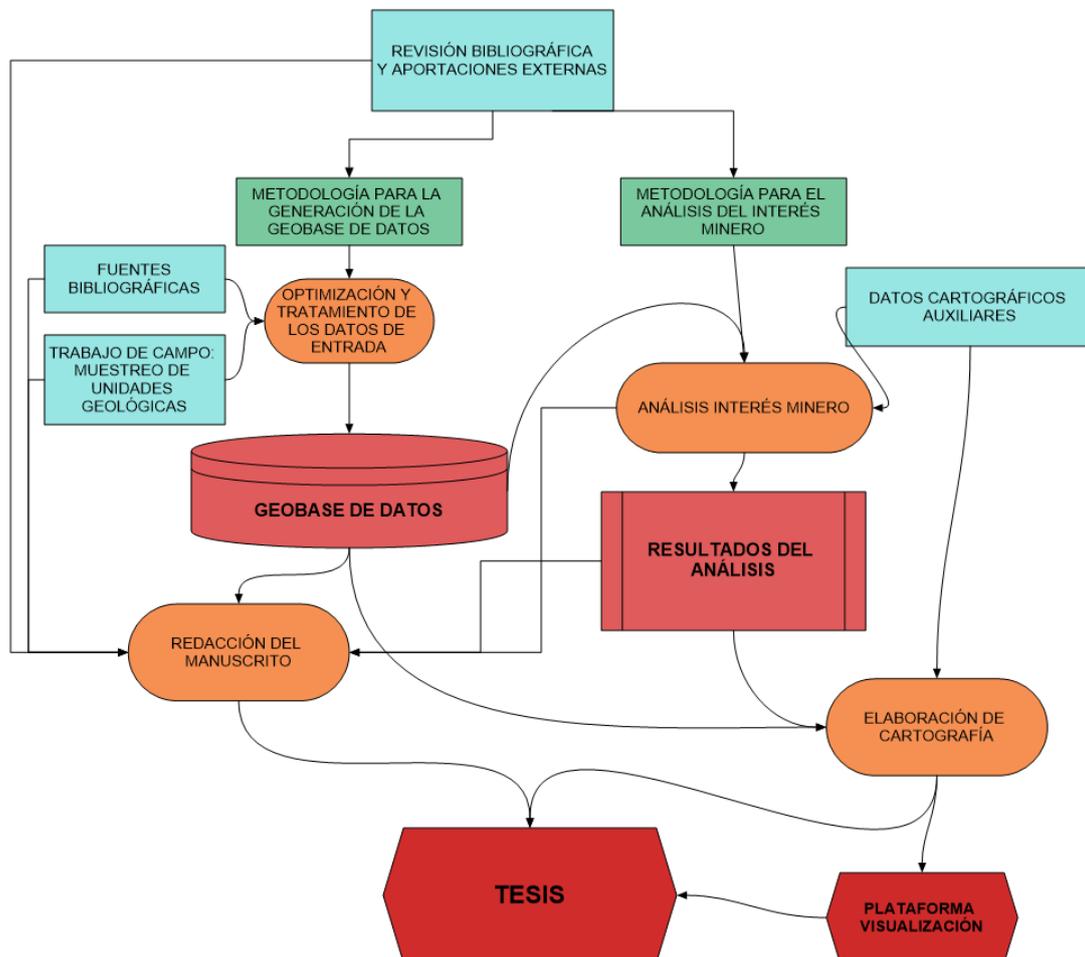


Figura 2.14. Diagrama metodológico que muestra el flujo de trabajo seguido en la tesis. Elaboración propia.

*Fase 3. Diseño de una metodología para el análisis de los recursos minerales de Aragón y su valoración en función de las dimensiones: perfil geológico, aptitud del terreno e inserción socioeconómica. Ejecución de los análisis pertinentes.*

La siguiente fase se centrará en el diseño y ejecución de la metodología de análisis de los recursos minerales, plasmando los criterios de valoración obtenidos a partir de la revisión bibliográfica pertinente, con el objetivo principal de responder a las tres cuestiones planteadas en párrafos anteriores. El análisis propuesto establecerá tres dimensiones fundamentales de análisis, relacionadas con las características geológicas y estratégicas del

cuerpo mineralizado, la respuesta del medio ante las perturbaciones producidas por la actividad minera y su inserción social, económica y ambiental en el contexto territorial en el que se localiza el yacimiento.

*Fase 4. Elaboración de una plataforma virtual que posibilite la visualización de los resultados obtenidos de un modo interactivo.*

Durante la cuarta fase de la tesis será generada la plataforma virtual para la visualización de los datos recopilados y de los resultados obtenidos durante las fases anteriores. Para ello se optará por la creación de una aplicación web de tipo geográfico, a modo de atlas virtual interactivo, en el que los recursos mineros y los datos auxiliares empleados se distribuyan espacialmente sobre el territorio aragonés.

*Fase 5. Síntesis final y formalización de los resultados.*

El elemento principal de esta etapa será la preparación del documento de síntesis que incorpore todos los aspectos desarrollados durante las fases anteriores, así como la elaboración de la cartografía que acompaña dicho documento.

## Capítulo III: Elementos y ámbito de estudio

3.1. Consideraciones previas

3.2. Metodología para la generación de la base de datos de los recursos minerales, energéticos y aguas de Aragón. Fuentes manejadas y tratamientos

3.3. Elementos del estudio: presentación sistemática de los recursos considerados

3.4. Ámbito de estudio: características ambientales y socioeconómicas del territorio

## ELEMENTOS Y ÁMBITO DE ESTUDIO

Este capítulo de la tesis se encuentra dividido en cuatro grandes bloques. La primera parte presenta una serie de consideraciones previas en relación con la definición, origen y clasificación de los recursos minerales. En el segundo apartado de este capítulo se describirán los pasos seguidos hasta la consecución de la base de datos de los recursos minerales, energéticos y aguas de la Comunidad Autónoma de Aragón, incluyendo las fuentes de las que procede la información empleada para ello y los tratamientos a los que esta fue sometida. En la tercera parte se realizará un análisis detallado de la geobase de datos generada, así como de los recursos que la componen, prestando una especial atención a los catalogados como críticos por la Unión Europea y a las muestras geológicas tomadas en el campo para estudiar su potencial como rocas madre generadoras de hidrocarburos. En el cuarto y último bloque se analiza el contexto geográfico y espacial en el que se localizan los recursos, que se corresponden con las características físicas y socioeconómicas de la región aragonesa.

### 3.1. CONSIDERACIONES PREVIAS

Todos los elementos químicos que conforman los minerales y las rocas se encuentran dispersos en la corteza terrestre, generalmente en concentraciones muy bajas (Oyarzun et al., 2010). En ocasiones, procesos geológicos, endógenos y exógenos, permiten la concentración anómala de ciertos elementos en puntos concretos de la corteza terrestre muy por encima de sus valores normales (Higueras, s. f.), dando lugar a yacimientos o mineralizaciones.

Estas concentraciones excepcionales de minerales o elementos químicos no siempre presentan un interés económico (Oyarzun et al., 2010). Los factores que determinan la viabilidad de una explotación minera son numerosos y muy variados. Algunos, intrínsecos e inmutables, dependen exclusivamente de la geología del yacimiento, como el tamaño, la morfología, la profundidad o la ley de la mineralización, entendido este término como la concentración de un elemento químico en una muestra, en un bloque mineralizado o en un yacimiento (Oyarzún y Oyarzun, 2014). En general, cuanto menos abundante sea un elemento en la corteza, mayor deberá ser su concentración relativa para que el yacimiento sea atractivo desde el punto de vista minero. Otros factores son extrínsecos al yacimiento y están relacionados con parámetros tecnológicos y, principalmente, económicos, aspectos sumamente variables en el tiempo.

En los siguientes apartados se tratará de analizar temas como el establecimiento de una definición de los recursos mineros y sus diferencias con el término reserva, la génesis de estos recursos y como los procesos generadores influyen en la localización de los yacimientos en el territorio, así como la clasificación de los recursos minerales.

#### 3.1.1 Recursos vs. reservas

Durante varias décadas se empleó como definición de yacimiento mineral la propuesta por Bateman (1951): *“Acumulaciones o concentraciones de elementos que están presentes en la corteza terrestre solo de forma diseminada”* (Bustillo y López Jimeno, 2000). Sin embargo, en la actualidad, el término yacimiento mineral tiene una connotación más económica, ligada a la posibilidad de obtener beneficio de su explotación. De esta forma,

Oyarzún y Oyarzun (2014), definen los yacimientos minerales como una *“concentración natural de minerales que presenta razonables posibilidades de ser explotada con provecho económico, ya sea en el presente o en un futuro relativamente cercano”*. Otras definiciones de yacimiento mineral inciden en el concepto del potencial económico: *“Cuerpos mineralizados susceptibles de explotación económica inmediata”* (Bustillo y López Jimeno, 1997) o *“Acumulación local, geológicamente establecida de un mineral específico, conjunto de minerales y/o rocas, que pueden ser extraídos bajo las condiciones económicas actuales”* (Gocht, Zantop, y Eggert, 1988).

Relacionado con el concepto de viabilidad económica surge, en el mundo minero, la diferenciación entre los términos reserva y recurso. Esta distinción queda plasmada en el diagrama de McKelvey (Figura 3.1.), en el que participan dos factores fundamentales: *el grado de conocimiento geológico y la capacidad tecnológica de la explotación*, que estará ligada a la rentabilidad económica del yacimiento. En este modelo los depósitos minerales, atendiendo a la capacidad tecnológica de recuperación, se dividen en económicos y subeconómicos, dependiendo de si pueden ser extraídos con beneficio económico empleando la tecnología actual y bajo los parámetros que dominan el mercado, o no. Por su parte, según el grado de seguridad geológica, los yacimientos se separan entre aquellos que han sido identificados y aquellos que se encuentran sin descubrir, que a su vez se dividen en hipotéticos y especulativos. Además, los recursos identificados se clasifican en inferidos (o posibles), indicados (probables) y medidos (probados) conforme aumenta el grado de conocimiento geológico sobre el yacimiento.

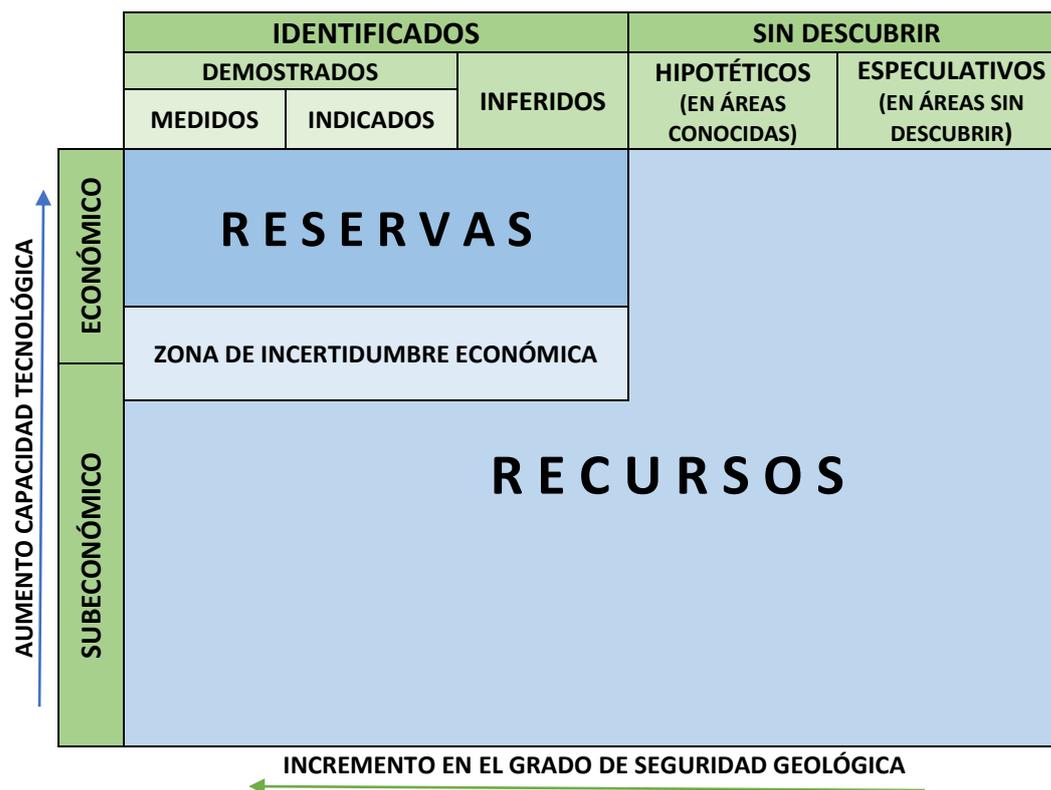


Figura 3.1. Diagrama de McKelvey. Este modelo define las reservas en función del conocimiento geológico y la capacidad tecnológica de explotación o rentabilidad económica. Modificado de (Bustillo y López Jimeno, 2000).

De forma simple, y tal y como indica el modelo de McKelvey, las reservas se corresponden con la fracción medida o identificada de los recursos minerales que puede ser extraída con beneficio económico (PERC, 2013). Los recursos, por su parte, incluyen tanto a las reservas como a otros depósitos minerales que podrían ser potencialmente aprovechables pero que en el momento actual no son viables desde el punto de vista tecnológico o económico, así como depósitos de los que se puede inferir su existencia pero que todavía no han sido descubiertos.

La pertenencia a una u otra categoría no es algo estático, ya que existen factores modificadores, entre los que se incluyen aspectos mineros, metalúrgicos, infraestructurales, económicos, legales, medioambientales, sociales y gubernamentales, que pueden convertir los recursos minerales en reservas, o viceversa (Figura 3.2.). Las formas más simples de intercambio en la categorización incluyen la exploración (por la que los recursos sin descubrir pueden pasar a formar parte de las reservas identificadas), las variaciones en los precios del producto y los avances tecnológicos.

Dada la naturaleza de los elementos con los que se ha trabajado en esta tesis, en sentido estricto, solo podrían ser considerados como reservas las explotaciones que se encuentran activas en la actualidad, puesto que son las únicas en las que se puede presuponer un interés económico suficiente. Es por esto por lo que a lo largo de esta tesis nos referiremos a los yacimientos e indicios minerales y a los diferentes tipos de aguas extraídas en la región con el término de recursos (que como se ha visto incluye también a las reservas).

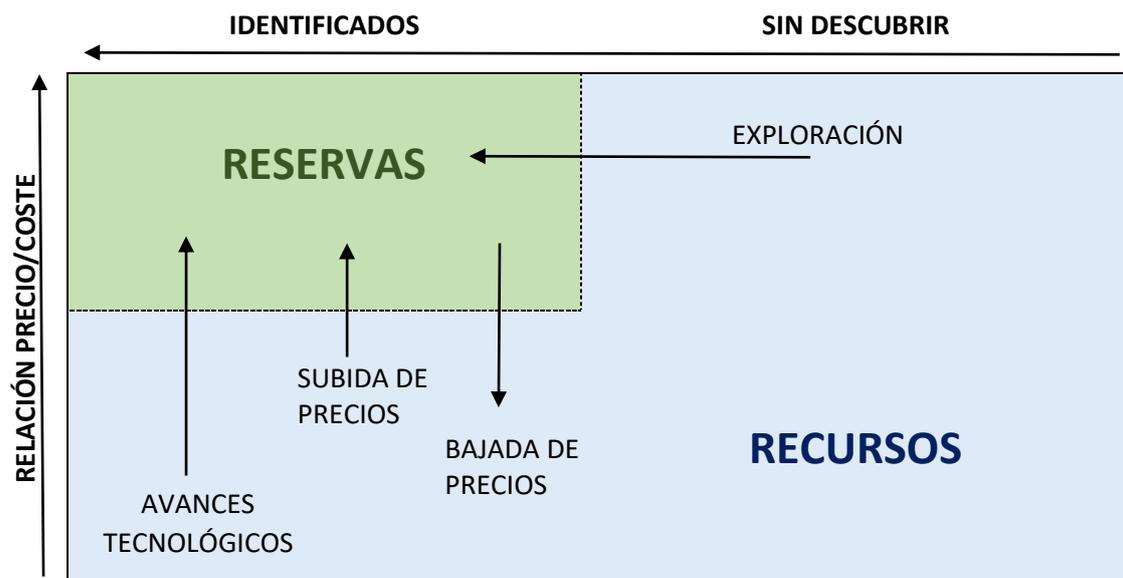


Figura 3.2. Principales factores que determinan la movilidad entre recursos y reservas. Modificado de (Bustillo y López Jimeno, 2000).

### 3.1.2. Origen de los recursos minerales

Como se analizó al principio de este capítulo, los yacimientos minerales son concentraciones anómalas de ciertos elementos químicos en puntos concretos de la corteza terrestre. Para que se generen estas concentraciones es necesaria la acción de la geología que, a través de diversos procesos, produce acumulaciones extraordinarias de elementos en determinadas ubicaciones. Estos procesos geológicos generan dos grandes grupos de yacimientos: los de minerales (metálicos o industriales) originados por fenómenos de extensión local que afectan a una roca o a un grupo de ellas, y los de rocas industriales y ornamentales, que se corresponden con áreas concretas de la formación geológica que, por sus características, resultan atractivas para la explotación minera (Higuera, s. f.).

Los procesos que controlan la generación de depósitos minerales son, principalmente, de tipo ígneo, sedimentario, metamórfico o hidrotermal, y se caracterizan por la segregación y concentración de determinados elementos químicos. Por ejemplo, los procesos sedimentarios relacionados con la precipitación de elementos pueden generar depósitos de evaporitas (como yeso o halita) o de calizas, mientras que los depósitos de corriente dan lugar a concentraciones de arenas y gravas. La laterización de rocas silicatadas en regiones tropicales origina la formación de bauxita, la principal mena de aluminio, siendo este uno de los principales ejemplos relacionados con la formación de yacimientos por procesos de meteorización (Oyarzún y Oyarzun, 2014).

Aunque la formación de yacimientos de elementos metálicos puede estar también relacionada con depósitos de tipo sedimentario (placeres de oro) y con otros tipos de procesos geológicos, la génesis de las menas metálicas se halla íntimamente asociada a procesos endógenos, de tipo ígneo o metamórfico. Entre los depósitos generados por fenómenos ígneos se incluyen los formados por segregación magmática, los depósitos hidrotermales, las pegmatitas y las kimberlitas; mientras que dos serán los tipos de metamorfismo más importantes en la formación de minerales: el metamorfismo regional y el de contacto. Todos estos procesos dan lugar a diferentes tipos de depósitos de minerales, cada uno con una paragénesis mineral característica, que servirán como modelos en la exploración de nuevos yacimientos.

Por último, destacar que la generación de los acuíferos, unidades geológicas lo suficientemente porosas y permeables como para acumular y permitir el tránsito de aguas subterráneas, estará también contralada por estos mismos procesos geológicos, así como por los movimientos del agua relacionados con el ciclo hidrológico.

Los procesos involucrados en la generación de las rocas y minerales con interés económico van a tener una influencia directa en su distribución en el territorio. Así, los minerales metálicos e industriales, cuya génesis generalmente está asociada a procesos ígneos y metamórficos, se localizan en las áreas montañosas que han sufrido una historia geológica más compleja. Como se verá en apartados posteriores, la inclusión en estas categorías de recursos como las sales y los yesos, formados de forma masiva por

precipitación química en la cuenca terciaria del Ebro hacen que los minerales metálicos e industriales no se limiten exclusivamente a las áreas montañosas de la región aragonesa.

Por otra parte, y aunque existen rocas industriales y ornamentales cuya génesis es de tipo volcánico, plutónico o metamórfico, la mayoría de las extraídas con fines económicos en Aragón tienen un origen sedimentario, tanto detrítico como por precipitación química o bioquímica, por lo que su distribución será más uniforme dentro de la región.

Por otro lado, el carbón se genera por el depósito de restos orgánicos de organismos, fundamentalmente de origen vegetal, y la posterior compactación y maduración en cuencas sedimentarias que presentan unas características concretas que favorecen su acumulación y transformación (Higuera, s. f.). Las condiciones propicias para la formación de carbón solo se dan en algunos medios concretos, lo que implica que los yacimientos se encuentren concentrados en algunas áreas específicas del territorio, como las cuencas carboníferas de Mequinenza y Teruel.

Finalmente, las explotaciones de aguas se relacionan con la presencia de acuíferos, por lo que su distribución en el territorio estará condicionada a la de estas masas de agua subterránea.

### 3.1.3. Clasificación de los recursos minerales

Los recursos minerales pueden ser clasificados de diversas formas empleando criterios diferentes, como su carácter renovable o no, los procesos que los generan, etc. En este trabajo se seguirá la categorización propuesta por Bustillo y López (1997), que divide los recursos minerales en:

- a) **Rocas y minerales industriales**, entre los que se incluyen las rocas y materiales de construcción, los fertilizantes o los materiales empleados en la industria química. Son geológicamente abundantes y se emplean en diversos campos. Suelen tener un precio bajo y se producen en gran cantidad, por lo que las canteras que las extraen estarán situadas cerca de donde se localiza su mercado.
- b) **Recursos minerales metálicos**, que a su vez se pueden subdividir en metales abundantes (Fe, Al, Mn, Ti, Mg...) y metales escasos (Cu, Pb, Zn, Sn, Au, Ag, Pt, etc.).

Estos recursos son menos frecuentes que las rocas y minerales industriales y su distribución más irregular. De este tipo de minerales se extraen los metales en ellos contenidos y tienen un precio más alto en el mercado que los minerales industriales. El reciclado juega un papel cada vez más importante en la minería metálica, puesto que las materias primas son limitadas y no renovables, supone un ahorro energético respecto a la minería primaria, presenta un menor impacto ambiental, e implica, además, una menor dependencia de los mercados externos.

- c) **Recursos energéticos**, como los combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas...) y los combustibles nucleares (uranio, torio, etc.).

El elevado número de elementos presentes en la Comunidad Autónoma de Aragón, así como la diversidad de recursos que representan, también obligó a la generación de una serie de categorías o grupos de recursos asimilables de cara a la planificación de la base de datos sobre los recursos de esta región. Estos grupos serán los empleados durante la fase de análisis al presentar, los recursos englobados en cada uno de ellos, unas características y una respuesta al medio similar entre ellos.

Esta división se realizó siguiendo los criterios básicos apenas expuestos, aunque debido a la gran cantidad de elementos registrados en la categoría correspondiente a las rocas y minerales industriales, se decidió subdividir esta sección en tres grupos diferentes: *rocas industriales*, *minerales industriales* y *rocas ornamentales*; además, se incorporó una categoría adicional para los diferentes tipos de agua. Cabe destacar que, en ocasiones, el límite que marca la pertenencia a uno u otro grupo puede ser muy sutil, y un mismo recurso podría pertenecer a diversos grupos. Además, puede ocurrir que un mismo recurso sea empleado para diferentes fines, por lo que una fracción variable de los puntos catalogados para este recurso podría pertenecer a categorías diversas. Un ejemplo de esta situación es la leonardita del entorno de Torrelapaja (Zaragoza), una sustancia mineral intermedia entre la turba y el lignito, y que a diferencia de este, cuyo destino principal es la generación de energía, es empleada como fertilizante para usos agrónomos, en la industria de la cerámica, farmacopea o en perforación de sondeos de petróleo (Rubio Navas et al., 2012). Sin embargo, y debido a la imposibilidad de conocer el destino final del producto de cada uno de los yacimientos que componen la base de datos, se prefirió obviar estos usos diversos y

mantener todos los puntos que representan las mineralizaciones de cada recurso en la misma categoría.

De este modo se establecieron, finalmente, seis categorías en las que fueron agrupados los más de cien tipos de recursos mineros y aguas localizables en la región. Concretamente, estos seis grupos son:

- *Aguas*
- *Rocas ornamentales*
- *Rocas industriales*
- *Minerales industriales*
- *Minerales metálicos*
- *Recursos energéticos*

### **3.2. METODOLOGÍA PARA LA GENERACIÓN DE LA BASE DE DATOS DE LOS RECURSOS MINERALES, ENERGÉTICOS Y AGUAS DE ARAGÓN. FUENTES MANEJADAS Y TRATAMIENTOS**

El proceso de recopilación de la información referente a los recursos minerales aragoneses, así como el tratamiento de los datos recabados para poder generar una geobase de datos unificada, fue la etapa más fatigosa y temporalmente más extensa de la tesis. Las fuentes que se consultaron para la elaboración del inventario fueron numerosas y de naturaleza muy diversa. Algunas de ellas consistían en bases de datos digitales de tipo geográfico, es decir, con unas coordenadas ya asignadas que vinculaban la información almacenada con un punto o con una superficie espacial concreta. Otras, por el contrario, eran fuentes literarias en la que la ubicación de una antigua mina, un yacimiento o un indicio mineral era explicada de forma descriptiva, aludiendo a distancias relativas y a topónimos locales. El carácter diverso de la información empleada en la creación del inventario, obligó a someterla a un proceso de unificación y homogeneización de los datos en crudo recopilados previamente, antes de poder obtener la geobase de datos final.

A continuación se describirá de forma concisa el repertorio de fuentes empleadas, las peculiaridades que presentaban y el tratamiento al que fue sometido el conjunto de los datos compilados.

### 3.2.1 Fuentes de información empleadas en la elaboración del inventario

Nueve fueron las fuentes consultadas en la elaboración de la Geobase de Datos de los recursos mineros, energéticos y aguas de Aragón. Como ya se ha comentado, algunas de ellas se encuentran en formato bibliográfico a modo de crónicas sobre la actividad minera en Aragón, manuales mineralógicos o informes complementarios a mapas sobre la geología y los recursos minerales de la región. Otros consistían en bases de datos digitales de diversa temática. Concretamente, estas fuentes son las presentadas a continuación:

- Catastro Minero: Gobierno de Aragón (IDEARAGON, 2015)
- Catastro Minero: Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital (Ministerio para la Transición Ecológica. Gobierno de España, 2015)
- Mapa Geológico de España 1:50.000 (IGME, 1972-2003)
- Servicios WMS del IGME:
  - Base de datos de Indicios o Explotaciones de Rocas y Minerales Industriales (IGME, 2014a)
  - Base de Datos de Metalogenia (Yacimientos e Indicios Minerales) (IGME, 2014b)
- Informes del Mapa de Rocas y Minerales Industriales 1:200.000
  - *Explicación del Mapa de Rocas y Minerales Industriales de Aragón. E. 1:300.000, 1996*
  - *Mapa de Rocas y Minerales Industriales 1:200.000. Hoja 47. Teruel.* (IGME, s. f.-b)
  - *Mapa de Rocas y Minerales Industriales 1:200.000. Hoja 40. Daroca.* (IGME, 1991)
  - *Mapa de Rocas y Minerales Industriales 1:200.000. Hoja 32. Zaragoza.* (IGME, s. f.-a)
- Libro Blanco de la Minería en Aragón (Rubio Navas et al., 2012)

- La Minería en Aragón (*La Minería de Aragón*, 1994)
- Minerales de Aragón (Calvo, 2006)

Las cuatro primeras fuentes de información nombradas son las que aportaron un mayor número de elementos al inventario, puesto que tanto los Catastros Mineros como los servicios WMS del IGME son ya bases de datos digitales que recogen información referente a minas, canteras, yacimientos e indicios minerales de forma georreferenciada. El resto de elementos de la lista fueron utilizados para completar la información, incorporar minas de carácter histórico e incluir algunas clases de minerales poco frecuentes pero con aplicaciones económicas en la industria.

En los siguientes párrafos se mencionarán las características principales de las fuentes empleadas, así como el tipo de datos en ellas contenidos.

#### **CATASTRO MINERO (ARAGÓN Y ESPAÑA)**

La Ley 6/1977 de Fomento de la Minería define el Catastro Minero como un archivo público permanentemente actualizado, en el que se recogen todos los derechos mineros existentes en el territorio nacional. En este catastro pueden ser consultados datos referentes a permisos e investigación, concesiones y autorizaciones de explotación de forma actualizada.

Es el Ministerio para la Transición Ecológica el que, en colaboración con las comunidades autónomas y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), elabora el Catastro Minero nacional. Al ser un producto fruto de la cooperación del gobierno central con las Comunidades Autónomas, la información ofrecida por los portales de visualización del Catastro del Gobierno de la Nación y el Gobierno Autonómico debería ser exactamente la misma. Sin embargo, y por fortuna para el proceso de recopilación de datos, esto no es completamente cierto. En el momento en el que se realizó la adquisición de los datos procedentes del catastro (2015), la última fecha de actualización de la información contenida en las bases de datos ofrecidas por cada administración era ligeramente diferente. De este modo, el Catastro Minero ofrecido por el Ministerio de Energía mantenía

un número elevado de registros concernientes a derechos mineros caducados y cancelados que la Infraestructura de Datos Espaciales de Aragón (IDEARAGON) había ya eliminado.

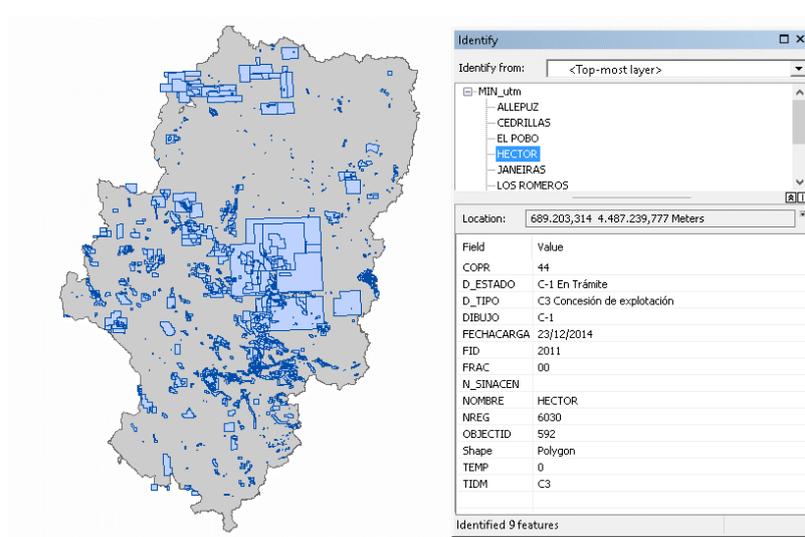


Figura 3.3. Información sobre el Catastro Minero descargable en la Infraestructura de Datos de Aragón. Elaboración propia.

Por otra parte, la forma de presentar la información es muy distinta en ambas administraciones. El Gobierno de Aragón permite, exclusivamente, consultar los datos referentes a los Derechos Mineros solicitados a la administración aragonesa. Esta consulta puede efectuarse dentro de la Infraestructura de Datos de Aragón (IDEARAGON) mediante el visualizador de datos cartográficos presente en su página web. Estos mismos datos pueden ser también descargados al equipo para efectuar su visualización y análisis con la ayuda de un SIG (Figura 3.3.).

Una aplicación accesible desde la página web del Ministerio de Energía permite consultar la información almacenada en el registro del catastro minero a nivel nacional. Esta aplicación incorpora la posibilidad de efectuar búsquedas alfanuméricas basadas en la sustancia explotada, la sección minera a la que pertenece, o la comunidad autónoma, provincia o municipio en la que se sitúa, así como una búsqueda cartográfica de los Derechos Mineros existentes en un territorio a través de su selección en un mapa.

Ambas opciones de consulta del catastro presentan sus ventajas e inconvenientes. Por un lado, los derechos mineros de la base de datos ofrecida por la Infraestructura de Datos Espaciales de Aragón llevan asociada información referente a la provincia en la que se

solicitó, el tipo de permiso, su estado, la sección minera a la que pertenece, el nombre del Derecho Minero y su número de registro, pero no de lo que, a efectos de este trabajo, hubiera sido más importante, la sustancia explotada.

Por otro lado, los resultados de la búsqueda alfanumérica en la aplicación del Ministerio de Energía (Figura 3.4.) ofrecen información muy relevante sobre los derechos mineros, incluida la sustancia explotada y sus coordenadas de localización. También es posible descargar todos los datos resultantes de la búsqueda efectuada y visualizar, de manera individual, los Derechos Mineros dibujados sobre un mapa. Sin embargo, no permite realizar la descarga de la información cartográfica para su procesado con un SIG.

*Resultados de la búsqueda*

Buscar...

25

Nombre D.M.	Empresa	Organismo	Sit.Gen.	Tipo	Frac.	Nº Reg.	Sustancia	Sup.	Uds.	Sec.
<a href="#">FUENMAYOR</a>	AGUAS DEL MAESTRAZGO	TERUEL	Autorizado	Aguas minerales y termales	00	1	Agua mineral	517.99	H	B
<a href="#">BRONCHALES 1</a>	AYUNTAMIENTO DE BRONCHALES	TERUEL	Autorizado	Agua mineral y termal	00	9003	Agua mineral	871.59	H	B
<a href="#">FUENTE DE LAS VENTAS</a>	CAÑIZAR SOCIEDAD DE DESARROLLO MUNICIPAL, S.A	TERUEL	Trámite/autorización	Agua mineral y termal	00	9005	Agua mineral	2	H	B
<a href="#">ZARCILLO</a>	AYUNTAMIENTO DE CAMARENA DE LA SIERRA	TERUEL	Trámite/decl-recurso	Agua mineral y termal	00	9007	Agua mineral	14	H	B
<a href="#">VALLEJO EL SORDO</a>	AYUNTAMIENTO DE BRONCHALES	TERUEL	Trámite/decl-recurso	Agua mineral y termal	00	9009	Agua mineral	0.3	H	B
<a href="#">MAS DE FOCINO</a>	AGUAS DE BORDÓN, S.L.	TERUEL	Trámite/decl-recurso	Agua mineral y termal	00	9014	Agua mineral	0.5	H	B

25

Resultados totales encontrados 6

Figura 3.4. Ejemplo de resultado de búsqueda de derechos mineros en la aplicación del Ministerio de Energía. Fuente: Catastro Minero (Gobierno de España).

Afortunadamente, los datos procedentes de ambas fuentes de información poseían un elemento común: un número de registro. Gracias a este dato pudo establecerse una vinculación entre la información cartográfica ofrecida por la IDEARAGON y los atributos alfanuméricos (especialmente la sustancia o sustancias extraídas) de la aplicación del Ministerio de Energía. Esta unión no resultó siempre sencilla, al existir números de registro repetidos para secciones diversas o elementos presentes en uno de los listados, pero ausentes en el otro.

## MAPA GEOLÓGICO DE ESPAÑA A ESCALA 1:50.000

El Mapa Geológico Nacional (MAGNA) es un producto realizado por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) entre los años 1972 y 2003. En él se representa la naturaleza de los materiales que afloran en la superficie terrestre, su distribución espacial y las relaciones geométricas que se establecen entre las diferentes unidades cartográficas. Este producto, realizado a escala 1:50.000, está compuesto por un conjunto de mapas que cubren el territorio formando rectángulos de, aproximadamente 28 km por 18 km de alto, y que conforman la Serie MAGNA. Cada uno de los mapas que componen la Serie MAGNA se nombra con el término de Hoja y, aparte de una numeración correlativa, lleva asignado el nombre de una localidad importante cubierta por la extensión del mapa. El área que compone la Comunidad Autónoma de Aragón se extiende por casi 120 Hojas.

MINERALES METALICOS Y NO METALICOS						
Nº (*)	COORDENADA UTM X Y Z	SUSTANCIA	MUNICIPIO (Provincia)	MORFOLOGIA Y/O TIPO	MINERALOGIA	OBSERVACIONES
1	X: 268.450 Y: 4596.950 Z: 295 m	Anhidrita	Fraga (Hu)	Sedimentaria- evaporítica	Anhidrita	Corresponde por el sondeo petrolífero Fraga I (1962) en el keuper (12111-1405 m de prof.) en el Muschelkalk medio (1531-1599) y en las facies rot del Bunt, terminal (1701-1750 aprox.)
2 (245)	X: 275.250 Y: 4596.375 Z: 260 m	Yeso	Torrente de Cinca (Hu)	Sedimentaria- evaporítica	Yeso	Antigua explotación ya inactiva para aglomerante sobre niveles del techo del Oligoceno-base del Mioceno
3 (245)	X: 275.375 Y: 4596.350 Z: 240 m	Yeso	Torrente de Cinca (Hu)	Sedimentaria- evaporítica	Yeso	Antigua explotación inactiva con el mismo fin de la anterior con la que dieron el indicio 245 del MRI (no se conserva ficha)
4	X: 274.725 Y: 4596.050 Z: 365 m	Cal	Torrente de Cinca (Hu)	Sedimentaria- evaporítica	Calcita	Antigua cantera de caliza miocena inactiva, que suministró material a un horno de cal
12 (9)	X: 278.525 Y: 4591.400 Z: 85 m	¿Plata?	Masalcorreig (L)	?	?	Corresponde al indicio 9 del Mapa metalogenético. No se tienen otras referencias y el entorno geológico no parece el más apropiado. Parece que existió una labor sobre calizas

(\*) Entre paréntesis el del Metalogenético 1:200.000 (2ª serie) o el del Mapa de Rocas Industriales

Figura 3.5. Ejemplo de tabla incluida en las memorias de la Serie MAGNA que analiza la presencia de yacimientos en la Hoja 415-MEQUINENZA. Fuente: Mapa Geológico de España 1:50.000 (IGME, 1997a)

En la página web del IGME, donde es consultable la información referente a este producto, además del mapa en diversos formatos, se encuentra disponible la memoria asociada a cada una de las hojas, así como información complementaria de carácter geológico empleada durante la elaboración de la cartografía. Es precisamente en esa memoria donde se localiza gran parte de la información empleada en este proyecto. Muchas de las memorias asociadas a los mapas que componen la Serie MAGNA presentan un

apartado referente a la geología económica, que incluye información sobre los recursos minerales presentes en el territorio, así como de las minas y canteras que alguna vez fueron explotadas. Si esta información no es muy relevante en alguna de las hojas que componen el Mapa Geológico Nacional, dicho apartado puede estar ausente en la memoria.

Los diferentes mapas que componen la Serie MAGNA fueron realizados por equipos de trabajos diversos. Las memorias a ellos asociadas, al ser redactadas por personas diferentes, muestran una manera de transmitir la información muy distinta. A veces, los datos referentes a los recursos minerales de un territorio se encuentran esquematizados en un formato de tabla (Figura 3.5.), lo que facilita la identificación de los indicios minerales, los yacimientos o las minas o canteras presentes en el territorio cubierto por esa hoja del Mapa Geológico. Sin embargo, en la mayoría de las memorias asociadas a los mapas geológicos esta información se transmite de una manera descriptiva, más o menos evidente. Sirva como ejemplo la exposición de la ubicación de una actividad extractiva procedente de la memoria asociada a la Hoja nº179-BIELSA (IGME, 1982): “... en el pasado se benefició el Pb-Zn de los filones de galena próximos a Bielsa, así como el Co de la mina de Gistain. Este último [...] situado en el término municipal de San Juan de Plan con cota aproximada de 1.900 m., entre la Estibeta y el Yerri, a unos 2 km. Al E. del pueblo.” o “Hay constancia de indicios de óxidos de magnesio en el Jurásico del S de Valacloche, en el Cerro de los Rechones” de la Hoja nº590-LA PUEBLA DE VALVERDE (IGME, 1983c).

No obstante, cuando los autores describen labores mineras presentes en el territorio, suelen acompañar esta representación con una simbolización de su ubicación en el propio mapa, como se observa en la Figura 3.6., distinguiendo entre las que se encontraban en explotación en el momento en el que mapa fue realizado y aquellas abandonadas ya en aquel instante.

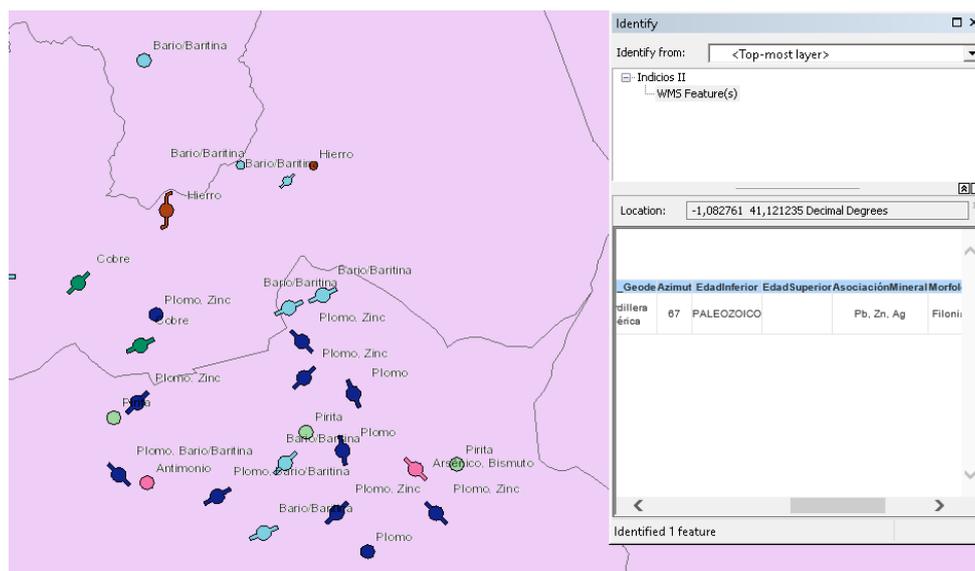


*Figura 3.6. Detalle del mapa correspondiente a la Hoja 519-AGUAVIVA en el que las minas o canteras se representan con dos martillos cruzados, invertidos en el caso de las explotaciones abandonadas. Fuente: Mapa Geológico de España 1:50.000 (IGME, 1979).*

La información procedente de esta fuente será empleada para completar la recopilada a partir de los registros del catastro desde una perspectiva más histórica. La serie completa del Mapa Geológico Nacional se realizó entre los años 1972 y 2003, si bien la mayoría de las hojas que cubren áreas del territorio aragonés fueron elaboradas en los años 80 y, menos frecuentemente, en la década de los 90. Esto implica que prácticamente todas las explotaciones que mantenían su actividad en el momento en el que se efectuaron los diversos mapas que componen el Mapa Geológico se habrán convertido, a efectos del inventario creado en esta tesis, en elementos históricos. Las memorias asociadas a los mapas de la Serie MAGNA también aportan información relevante sobre estudios de indicios mineros efectuados tiempo atrás, que no han derivado en la solicitud de apertura de ningún tipo de Derecho Minero.

### **SERVICIOS WMS DEL IGME**

Estos productos elaborados y ofrecidos por el Instituto Geológico y Minero servirán también para completar la información de carácter estrictamente actual contenida en las bases de datos del Catastro.



*Figura 3.7. Ejemplo de WMS de Metalogenia en una zona de la Cordillera Ibérica que cubre áreas de las comarcas zaragozanas del Campo de Cariñena y Campo de Daroca al norte, y la Comarca del Jiloca, en Teruel, al sur. Elaboración propia.*

Un WMS (Web Map Service) es un servicio web que genera mapas de datos georreferenciados espacialmente de forma dinámica a partir de información geográfica (IECA, 2017). En la práctica, los servicios WMS permiten visualizar información de bases de datos albergadas online cargándola directamente en un SIG. Existen numerosos servicios WMS ofrecidos por el IGME, de naturaleza muy diversa, incluida la versión digital del Mapa Geológico Nacional. Fueron dos los servicios WMS empleados en la elaboración del inventario vinculado a este proyecto:

- Base de datos de Indicios o Explotaciones de Rocas y Minerales Industriales
- Base de Datos de Metalogenia (Yacimientos e Indicios Minerales)

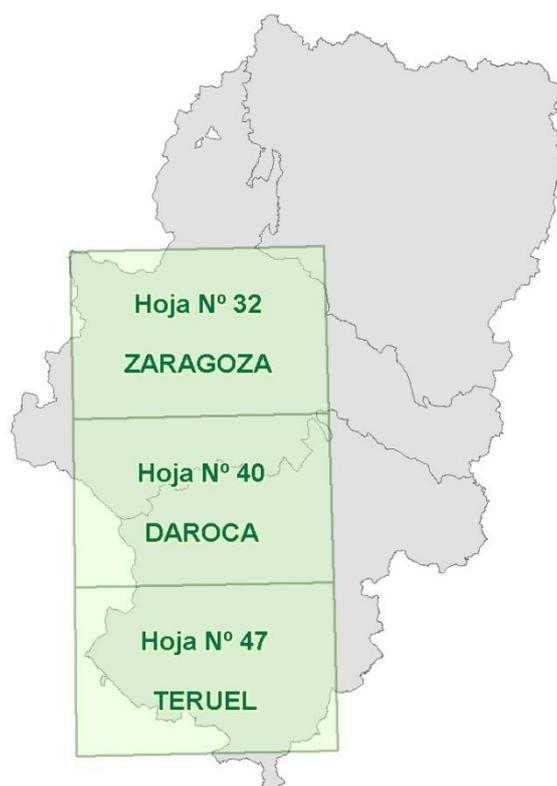
Las bases de datos que nutren ambos servicios WMS están constituidas por capas en las que se almacena información sobre la distribución en la geografía española de yacimientos e indicios de rocas y minerales industriales, por una parte, y de minerales metálicos, por la otra (Figura 3.7.). La información viene simbolizada en forma de elementos puntuales con una serie de atributos referentes a aspectos como el tamaño del yacimiento, los elementos asociados o la morfología de la mineralización.

La información contenida en los servicios WMS no puede ser directamente empleada para otros fines que no se correspondan con la mera visualización de los datos, no

admitiéndose tampoco su descarga directa. Para que estos elementos puedan ser incluidos dentro de la base de datos referente a los recursos mineros de Aragón y ser sometidos a los análisis realizados en este proyecto, la información contenida en el WMS tuvo que ser digitalizada de forma manual, incorporando cada dato de forma individual.

#### **EXPLICACIÓN DEL MAPA DE ROCAS Y MINERALES INDUSTRIALES DE ARAGÓN (1:300.000) E INFORMES DEL MAPA DE ROCAS Y MINERALES INDUSTRIALES 1:200.000**

Tanto el mapa a escala 1:300.000 sobre Rocas y Minerales Industriales de Aragón, los Mapas de Rocas y Minerales Industriales 1:200.000 que analizan superficies correspondientes al territorio aragonés, como las memorias que los acompañan fueron elaborados por el IGME con la ayuda del Gobierno de Aragón.



*Figura 3.8. Área cubierta por las hojas del Mapa de Rocas y Minerales Industriales 1:200.000 consultadas. Elaboración propia.*

Gracias al convenio de colaboración entre el Gobierno de Aragón y la Universidad de Zaragoza, fue posible estudiar el contenido de las memorias referentes al Mapa de Rocas y Minerales Industriales a escala de Aragón, así como el de algunos de los mapas de la Serie

1:200.000. Concretamente, se encontraban disponibles las hojas número 40 (Daroca), 47 (Teruel) y 32 (Zaragoza). Estas tres entidades cubren con un nivel de detalle mayor gran parte de la provincia de Teruel (a excepción de las áreas más orientales) y el centro de la provincia de Zaragoza (Figura 3.8.).

Las memorias explicativas asociadas a los Mapas de Rocas y Minerales Industriales presentan un análisis de la geología y las litologías fundamentales representantes de cada periodo geológico, así como otros datos económicos y técnicos relacionados con la minería aragonesa y sus productos.

Sin embargo, la información que resultó más interesante para la realización del inventario sobre los recursos mineros de Aragón se localizaba en el apartado en el que se describían las explotaciones e indicios presentes en el territorio. Allí se analizaban las principales características de cada uno de los productos mineros que, o bien se han explotado en la zona, o bien se tiene constancia de la existencia de indicios que los relacionen con ella, incluyendo análisis técnicos como los referentes a sus características composicionales, los cuales sobrepasan los propósitos de esta tesis. La existencia de tablas esquemáticas en las que se exponen aspectos como el tamaño, la situación de actividad en la que se encuentra la explotación o, sobre todo, las coordenadas que permiten ubicar cada punto en el mapa, facilitó enormemente el trabajo. En la Tabla 3.1. se expone, a modo de ejemplo, la tabla facilitada por los autores de la Hoja de Teruel en las que se presentan las principales características de las explotaciones e indicios inventariados referentes a las calizas de Malm.

Tabla 3.1. Información sobre las exportaciones e indicios de calizas del Malm en la Hoja de Teruel del Mapa de Rocas y Minerales Industriales 1:200.000 (IGME, s. f.-b).

Nº	Formación	Hoja 1/50.000	Coordenadas U.T.M.	Estado	Reservas	Producción t/año
43	15	567	666.700-4473.000	Aband.	Altas	
65	15	590	671.650-4461.100	Aband.	Altas	
113	15	614	690.700-4446.100	Inter.	Medias	630
118	15	614	693.300-4431.500	Aband.	Altas	
121	15	614	709.300-4439.800	Aband.	Altas	
188	15	590	682.150-4448.650	Aband.	Altas	
189	15	590	675.300-4454.300	Indicio	Altas	
193	15	614	697.700-4433.850	Indicio	Altas	
194	15	614	691.500-4444.600	Indicio	Altas	
195	15	614	683.200-4448.150	Indicio	Altas	

En cualquier caso, y como ocurría con los dos últimas fuentes analizadas, es decir, los servicios WMS y la serie MAGNA del Mapa Geológico, la información incluida en estas memorias fue recopilada hace ya varios años. Si bien este desfase cronológico no afectará a la localización de los indicios y yacimientos minerales presentes en el territorio, sí que habrá que tener en cuenta que la mayoría de las explotaciones que en estas memorias aparecen como activas estarán, hoy en día, clausuradas. De este modo, mientras que la mayoría de elementos registrados en el inventario dentro de las categorías *En explotación* y *Con derechos otorgados o en tramitación* proceden de los registros de Derechos Mineros recogidos en las dos bases de datos del Catastro consultadas, las tres últimas fuentes analizadas incorporaran al inventario un alto número de *Indicios* y de yacimientos *Potencialmente recuperables*.

#### FUENTES BIBLIOGRÁFICAS

Las últimas tres fuentes empleadas en la elaboración del inventario son de tipo bibliográfico. Dos de estos libros han sido publicados por el Gobierno de Aragón, uno de ellos, el Libro Blanco de la Minería en Aragón, en colaboración con el IGME. Por su parte, la publicación *Los Minerales de Aragón* fue realizada por un autor particular, Miguel Calvo.

En cualquier caso, el número de elementos incorporados a partir de estas fuentes fue, en general, netamente inferior al procedente del resto de informes y bases de datos. Al no ser fuentes tan directas como las analizadas hasta el momento, las cuales o bien eran bases de

datos ya en forma de mapa, o bien poseían una serie de coordenadas que permitían su ubicación en el espacio, fueron consultadas con el objetivo de completar el inventario generado a partir de las más inmediatas.

Estas tres fuentes bibliográficas, sin embargo, serán muy importantes para estudiar las características de los productos mineros presentes en Aragón, así como para conocer la trayectoria que esta actividad económica ha seguido en el territorio aragonés desde tiempos ancestrales. Otra información muy importante que podrá ser extraída de estas obras, especialmente en el caso de los elementos metálicos, será el origen de los yacimientos, así como el tipo de minerales que forman los elementos químicos establecidos como categorías de la base de datos.

### **Libro Blanco de la Minería de Aragón**

El *Libro Blanco de la Minería de Aragón* es un extenso informe elaborado por el IGME en colaboración con el Gobierno de Aragón, en el que se estudia y analiza la actividad del sector industrial minero, así como el aprovechamiento de otros recursos geológicos en la Comunidad Autónoma de Aragón. En esta memoria no solo se realiza un profundo análisis de los recursos geológicos y mineros de la región, sino que también se incluyen apartados en los que se estudian, en el contexto aragonés, los productos resultantes de la actividad minera, el análisis socio-económico del sector minero o la relación entre minería y medio ambiente.

Hay que destacar que esta fuente de información es la única de entre todas las empleadas que dedica un apartado extenso al análisis de los recursos relacionados con las aguas naturales, minerales, industriales y termales.

### **La Minería de Aragón**

Esta obra fue publicada por el Gobierno de Aragón en el año 1.994. Comienza con dos apartados en los que se describe la historia, por un lado de la minería en Aragón desde la Edad de Piedra hasta la actualidad, y por el otro, repasa muchos de los estudios, mapas, tesis y trabajos sobre la geología y la minería en la comunidad. La parte más extensa de esta publicación se corresponde con la descripción de los principales yacimientos mineros y

explotaciones activas en aquel momento. Los autores dividen esta información según el tipo de recurso minero en recursos energéticos, minerales metálicos, minerales industriales y rocas industriales.

Los capítulos finales, como en la obra anterior, están destinados a la descripción del sector transformador de los recursos minerales previamente analizados y a la evaluación y análisis económico de la minería aragonesa.

### **Minerales de Aragón (Miguel Calvo)**

Se trata de una especie de atlas en el que se describen sistemáticamente todos los minerales que alguna vez han sido localizados dentro del territorio aragonés. Muchos de los minerales descritos en esta obra son de escasa relevancia desde la perspectiva de esta tesis, algunos por carecer de interés económico y otros por aparecer de forma casi anecdótica. No obstante, gracias a esta fuente se han podido añadir al inventario algunos minerales industriales de interés económico que no aparecían en el resto de las obras consultadas, entre ellos la aerinita, la aluminita, la alunita, la prenhita o el topacio.

El autor describe a lo largo de la obra cada mineral de un modo individual. En el caso de los minerales menos relevantes la exposición será relativamente breve, mientras que la extensión será mucho mayor en aquellos minerales más importantes desde un punto de vista geológico o económico. Para estos últimos, suele incluir una descripción detallada de la historia de la minería de ese mineral, que a veces se remonta a la época romana e, incluso, pre-romana.

Para explicar la ubicación espacial del mineral analizado el autor emplea métodos descriptivos, utilizando topónimos locales y distancias relativas. Se añade, como ejemplo, un breve fragmento recogido dentro de la descripción de la aluminita: *“La aluminita aparece como nódulos de color blanco, de un tamaño de hasta 10 cm, dentro de un nivel de arcillas negras de la formación Escucha, en el barranco del arroyo de Escucha, cerca del paraje de las Casas del Molar, a unos 2 km al NE del pueblo de Escucha, en término de Montalbán (Teruel).”* (Calvo, 2006).

### 3.2.2. Criterios de unificación de los datos inventariados

Al emplearse fuentes de información tan variadas, tanto en su formato como en la manera de presentar los datos, fue necesario establecer una serie de criterios que unificaran y homogeneizaran todo ese contenido. En los siguientes apartados se analizarán brevemente los pasos efectuados para lograr una base de datos unificada.

#### DIGITALIZACIÓN DE LAS FUENTES CONSULTADAS

Se entiende como digitalización el proceso de conversión de una magnitud física, un texto o una señal analógica en una representación digital. Desde la perspectiva de esta tesis, la digitalización consistirá en la conversión de la información referente a las explotaciones, yacimientos e indicios minerales contenidas en fuentes físicas (o pensadas originalmente para su publicación en ese tipo de formato), a través de textos o tablas, en archivos de tipo espacial en los que los atributos ligados a dichas explotaciones, yacimientos o indicios posean unas coordenadas que permitan ubicarlos en un mapa.

Como se ha venido comentando mientras se analizaban las distintas fuentes de información empleadas en la generación de la base de datos, a excepción del contenido referente al catastro minero ofrecido por la Infraestructura de Datos Espaciales de Aragón y los servicios WMS del IGME, el resto de las fuentes consultadas no se encontraba en formato de archivos de mapa, por lo que fue necesaria digitalizarlas manualmente. Incluso en el caso de los servicios WMS la información no podía ser descargada directamente, por lo que el trasvase de información se hizo también de una manera manual.

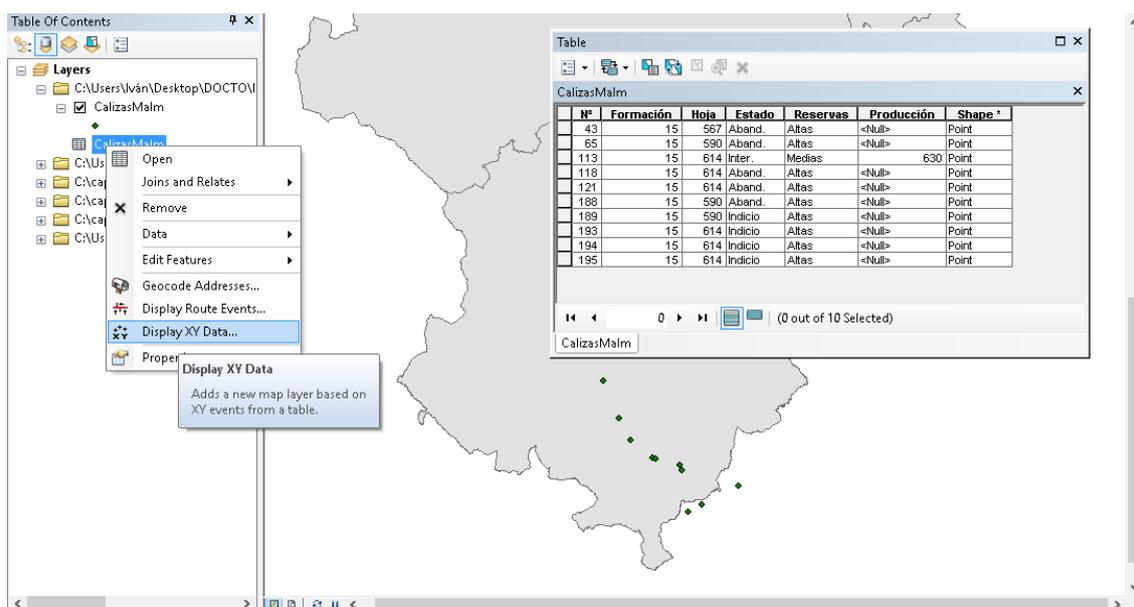


Figura 3.9. Ejemplo de empleo de la herramienta que permite transformar la información registrada en una tabla con coordenada en un archivo de mapa. Elaboración propia.

Los métodos empleados para la transformación de los datos consultados a un formato de archivo de mapa fueron muy variados, en función del tipo de información de la que se partía. Algunos de los procesos resultaron muy sencillos, especialmente cuando entre la información aportada por los autores se encontraba también algún tipo de coordenadas que permitieran un posicionamiento unívoco de los puntos que debían de ser digitalizados. Tal es el caso de las explotaciones e indicios minerales recogidos en las memorias asociadas a la serie de Mapas de Rocas y Minerales Industriales. A pesar de tratarse de fuentes de tipo impreso, el hecho de que la información referente a las explotaciones e indicios minerales presente una tabla en la que los datos de tipo espacial (coordenadas) se encuentran asociados a una serie de atributos, permitirá que el proceso de digitalización se automatice, minimizando los tiempos de procesado. Los Sistemas de Información Geográfica cuentan con herramientas que permiten la transformación de tablas en las que exista un par de coordenadas X e Y en archivos de mapa. En ArcGIS esta utilidad recibe el nombre de *Display XY data...* (Figura 3.9.). Por otro lado, en algunas de las memorias asociadas a las hojas de la Serie MAGNA del Mapa Geológico Nacional, los datos referentes a yacimientos, indicios o labores mineras también se presenta en forma de tablas con coordenadas asociadas, por lo que el tratamiento de los datos será similar.

La digitalización de la información procedente del resto de fuentes basada en textos descriptivos, en las que no se facilitan las localizaciones precisas por medio de métodos absolutos, no será tan sencilla. La forma de asociar estas descripciones con la ubicación precisa de los yacimientos, indicios o labores extractivas variará dependiendo de la fuente de la que procedan y de la información empleada en las descripciones. Así, las descripciones proporcionadas por los autores de las memorias asociadas a los mapas de la Serie MAGNA tienden a utilizar, para la ubicación de los diferentes elementos, información contenida en el mapa al que acompañan. De este modo, suelen mencionar topónimos de localidades y elementos geomorfológicos presentes en el propio mapa; si bien, en la mayor parte de los casos, las explotaciones y yacimientos mineros vienen relacionados con la formación geológica en la que se localizan.

Por otra parte, el autor del libro *Minerales de Aragón* parece utilizar como referente los topónimos empleados en los mapas topográficos, sirviéndose de distancias relativas medidas a partir de dichos elementos naturales o antrópicos. El visor del Sistema de Información Geográfica de Parcelas Agrícolas (SIGPAC) del Gobierno de Aragón utiliza como base el Mapa Topográfico a diversas escalas según el nivel de zoom (Figura 3.10.). De este modo, se pudieron localizar una gran parte de los elementos topográficos empleados en esta obra como referencia para determinar la ubicación de los minerales.

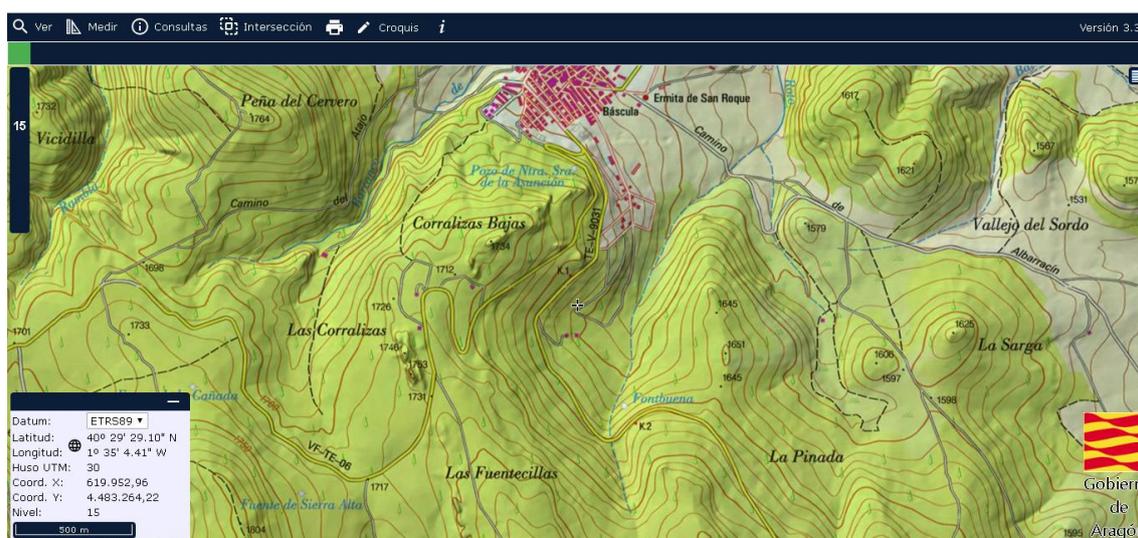


Figura 3.10. Ejemplo de mapa topográfico con topónimos locales. Fuente: SIGPAC ARAGÓN (Gobierno de Aragón, 2019).

### TRANSFORMACIÓN DE LOS ELEMENTOS SUPERFICIALES (DERECHOS MINEROS) EN PUNTUALES

A pesar de que las labores extractivas y las mineralizaciones son elementos que cubren una cierta extensión del territorio y que, desde la perspectiva cartográfica podrían ser perfectamente representados mediante polígonos que abarquen una determinada superficie, el hecho de que la mayoría de las fuentes consultadas traten estas minas, canteras, yacimientos e indicios minerales como elementos puntuales, determinados por una par de coordenadas XY, hizo que se decidiera simbolizar el conjunto de registros que componen la geobase de datos como elementos de tipo puntual. A tomar esta decisión ayudó el hecho de que resulta mucho más sencillo convertir una superficie poligonal en un punto contenido en ese polígono que a la inversa, construir un polígono que cubra la superficie por la que se extiende, por ejemplo, una mineralización, sin contar con una información más profunda sobre la misma. También, aunque se pierda cierta precisión en los resultados, la ejecución de los análisis propuestos será mucho más cómoda de realizar si los datos introducidos son elementos puntuales.

De esta forma, los derechos mineros obtenidos de la Infraestructura de Datos Espaciales de Aragón, que veían representados por polígonos que cubrían una superficie variable del territorio, debieron ser transformados en elementos puntuales. Estos derechos mineros, especialmente en el caso de los concedidos para las fases de estudio y exploración de los recursos naturales presentes dentro de su perímetro, cubren un área mucho mayor de la que realmente representaría la explotación o de la que supone la extensión del recurso. Es por este motivo por el que, en la transformación de los Derechos Mineros a elementos puntuales tuvo que ser analizado, caso por caso, el lugar en el que ese punto iba a ser ubicado dentro del área cubierta por el polígono.



*Figura 3.11. Derecho Minero Marco Antonio Fr. 2ª para la explotación de yeso en Pina de Ebro (Zaragoza). El punto morado representa el registro referente a esa explotación dentro de la base de datos. Elaboración propia.*

En el caso de los derechos mineros en los que efectivamente se está llevando a cabo una labor extractiva dentro de su perímetro, o incluso cuando la explotación ha cesado ya su actividad pero no ha sido completamente restaurada el área afectada, la ubicación del registro que representará en la base de datos a ese derecho minero será fácilmente localizable mediante foto aérea (Figura 3.11.).

En el caso de los derechos mineros en los que no hay explotaciones en activo, porque no se han iniciado todavía o porque se continúa en la fase de exploración, la transformación de esta entidad poligonal en un elemento puntual será menos directa. Cuando dentro de la superficie delimitada por el derecho minero existan entidades procedentes de las otras fuentes consultadas referentes al mismo elemento que suscitó la solicitud de apertura de ese derecho, se entenderá que el recurso se ubica en esa posición. Si tampoco existieran este tipo de entidades procedentes de otras fuentes de información, para realizar la conversión se utilizaría la foto aérea y el mapa geológico, intentando localizar pruebas que permitan determinar la zona de mayor interés dentro del derecho minero. Finalmente, en los casos en los que no fue posible aplicar ninguna de las metodologías mencionadas hasta el momento, se determinó ubicar el punto que representa ese derecho minero en la base de

datos en un lugar más o menos centrado con respecto a la superficie por la que este se extiende.

#### DEPURACIÓN DE LOS DATOS

Una vez que se digitalizó toda la información procedente de las diversas fuentes consultadas y los derechos mineros fueron transformados en elementos puntuales, fue necesaria la ejecución de un proceso de depurado de los datos. La labor principal que se tuvo que llevar a cabo para ello fue la eliminación de los elementos repetidos en la base de datos.

Como se comentó en el apartado correspondiente a las fuentes empleadas en la elaboración del inventario, muchas de ellas fueron planificadas individualmente, o en colaboración con otras entidades, por el Instituto Geológico y Minero de España. Este hecho implica que varios de los elementos que componían esta primera versión del inventario estuvieran repetidos, es decir, se refirieran a la misma labor minera, yacimiento o indicio mineral. Durante esta fase, esos elementos duplicados fueron eliminados, no sin antes combinar la información que aportaban los autores de las diversas fuentes.

#### UNIFICACIÓN DE LAS NOMENCLATURAS

El último paso antes de la consecución de la base de datos final consistió la unificación de las nomenclaturas, puesto que la diversa procedencia de los datos que componían el inventario implicaba, en la mayoría de los casos, la utilización de términos diferentes para hablar del mismo concepto. Algunos de estos términos fueron sencillos de homogeneizar, puesto que eran sinónimos utilizados para referirse al mismo concepto. Por ejemplo, algunas de las fuentes utilizaban el término “reservas” para designar el tamaño del yacimiento.

Más problemática fue la búsqueda de los términos que constituyeran las categorías para designar el estado de actividad de cada una de las entidades, así como el correspondiente a los recursos inventariados. En el caso de la nomenclatura empleada en la denominación de los diferentes elementos minerales y aguas identificados y/o explotados en el territorio aragonés, se prefirió mantener la utilizada en las diferentes fuentes, aún a pesar de que

pudiera considerarse en algunos casos reiterativa, de modo que se remarcaran las distinciones establecidas por los autores de las fuentes consultadas.

El paso final para la obtención de la base de datos descriptiva que contiene la información referente a las labores extractivas, yacimientos e indicios minerales, así como la ubicación de los derechos mineros destinados a la explotación de aguas en el territorio aragonés será la categorización de los elementos que componen el inventario en grupos de características similares. Desde el inicio de la tesis estos grupos han ido variando, y aunque en un principio se decidió dividir los elementos empleando como criterio la sección minera a la que pertenecían, al final se optó por crear grupos de recursos con características similares que permitieran individualizar los análisis territoriales y socioeconómicos para cada conjunto.

### 3.2.3. El tamaño de las explotaciones mineras y sus implicaciones metodológicas

A pesar de que con el objetivo de homogeneizar los indicios minerales, yacimientos, explotaciones abandonadas e, incluso, derechos mineros inventariados, así como para facilitar los cálculos correspondientes a los diferentes indicadores incluidos en la caracterización de los registros, estos se han representado como entidades puntuales, en realidad, las explotaciones mineras presentan una cierta extensión superficial. Para la resolución de los cálculos concernientes a algunos de los criterios empleados en el análisis será necesario tomar en consideración dicha extensión.

Determinar la superficie que cada labor minera ligada a los puntos inventariados ocuparía en el espacio es sumamente complicado, ya que va a depender de un elevado número de características propias de cada mineralización. El factor más determinante en la morfología y la extensión lateral de una labor minera es el tamaño y la distribución del propio cuerpo mineralizado o del depósito mineral (localización, rumbo y buzamiento). En numerosas ocasiones, el beneficio económico de una explotación se corresponde con estratos o enriquecimientos desarrollados en ellos y en vetas, cuya potencia es mucho menor que su extensión lateral, lo que condiciona que numerosas labores tengan expresiones superficiales lineales, más largas que anchas (Figura 3.12.).



*Figura 3.12. Morfología de una explotación de caolín en Berge (Teruel). Elaboración propia.*

Sin embargo, existen otros factores que influyen en la morfología de las labores mineral, entre los que destacan: las características físicas de la roca encajante o del material situado sobre el depósito, la presencia de aguas subterráneas, factores económicos y factores ecológicos y ambientales (Servicio Geológico Mexicano, 2017).

Ante la imposibilidad de determinar la morfología y el tamaño particular de cada una de las posibles explotaciones mineras, fue necesario establecer un radio en torno a los puntos inventariados que sirviera como aproximación para poder analizar de un modo razonable los indicadores que implican una extensión superficial en su resolución. El objetivo, por tanto, consistió en establecer un área circular en torno al yacimiento o indicio mineral inventariado que fuera representativa y que se adecuara al tamaño de las explotaciones reales.

Para lograr esta meta se analizó, mediante foto aérea, la extensión de las diferentes labores mineras activas en el territorio o aquellas que no han sido todavía completamente restauradas y su huella superficial sigue siendo observable. Para ello, se delimitó el contorno

de una muestra consistente en 217 explotaciones mineras actuales o abandonadas, generando la circunferencia que las envuelve completamente y calculando el tamaño del círculo que definen (Figura 3.13.).



*Figura 3.13. Perímetro de la explotación de arcilla “Los Cirios” en Rubielos de Mora (Teruel) y circunferencia que lo inscribe. Elaboración propia.*

Los valores correspondientes a las áreas de los círculos que inscriben el perímetro de las diferentes explotaciones mineras muestreadas fueron tratados estadísticamente, agrupándolos en diversas categorías en función de su tamaño. Como resultado, se obtuvo un gráfico de barras (Figura 3.14.) que mostraba el número de explotaciones que pueden ser circunscritas en círculos cuya área se encuentra comprendida en un determinado rango.

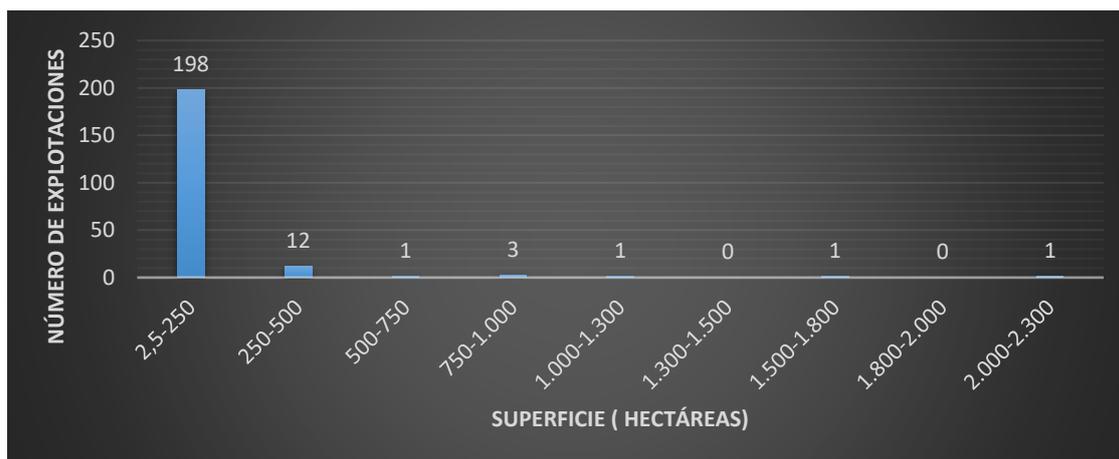


Figura 3.14. Gráfica que muestra la frecuencia relativa de explotaciones mineras en función del área del círculo en el que se circunscribe su perímetro. Elaboración propia.

A pesar de que el valor medio correspondiente al área de los círculos analizados es de en torno a 105 hectáreas, lo que implica un radio aproximado de 580 metros, el radio definitivo que será tomado en cuenta para los cálculos anteriormente mencionados será de 1.300 metros. El radio seleccionado define un área de algo más de 500 hectáreas, superficie que abarcaría totalmente el perímetro del 97% de las explotaciones mineras muestreadas.

Este valor será el radio utilizado en los cálculos de algunos indicadores como el grado de parcelación o la pendiente media en el entorno de la mineralización. No implica que toda la superficie delimitada por este radio vaya a ser utilizada en una potencial explotación minera, pero asegura que el terreno que efectivamente se vería afectado queda dentro del área delimitada por la circunferencia de radio igual a 1.300 metros. No obstante, se trata de un valor bastante conservador, puesto que la mayoría de las explotaciones muestreadas tienen un diámetro mucho menor. Además, las explotaciones circunscritas en circunferencias de radio mayor al establecido para los cálculos suelen ser el resultado de la coincidencia de varias labores mineras adyacentes.

### 3.3. ELEMENTOS DEL ESTUDIO: PRESENTACIÓN SISTEMÁTICA DE LOS RECURSOS CONSIDERADOS

Durante el proceso de generación de la base de datos dedicada a los recursos energéticos y minerales de Aragón fueron registradas más de 5.000 entidades correspondientes a, exactamente, 101 tipos de recursos distintos. Estos puntos simbolizan yacimientos, indicios

minerales, derechos mineros, canteras y minas, actuales o históricas, de la región aragonesa y proceden de numerosas fuentes de información, analizadas en apartados previos de este capítulo.

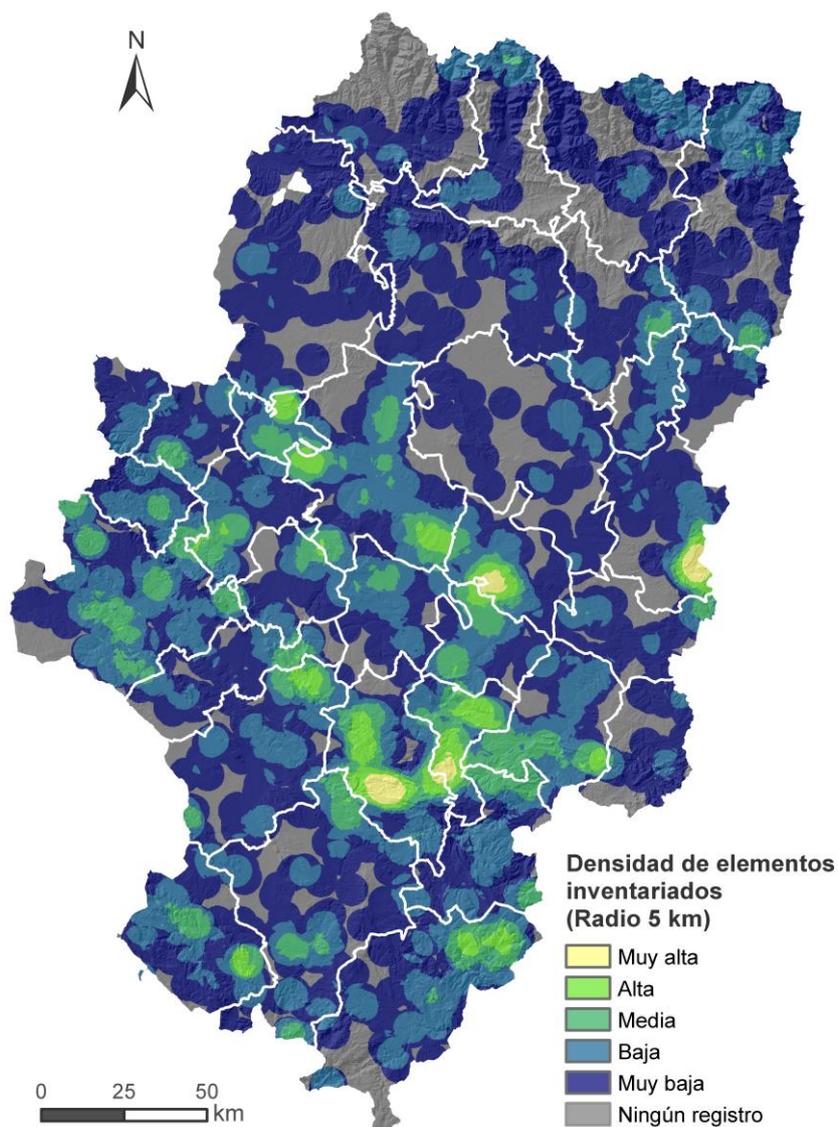


Figura 3.15. Densidad de elementos registrados en la base de datos en un radio de 5 km. Elaboración propia.

La distribución de los puntos inventariados es tremendamente irregular. El mapa de calor que representa la densidad de puntos inventariados en el territorio (Figura 3.15.) muestra una clara concentración de minas, derechos mineros, yacimientos o indicios en algunas zonas concretas, entre las que se incluyen la cuenca minera turolense, la cuenca lignífera de Mequinenza o la ribera baja del Ebro, área en la que la explotación del alabastro cuenta con una larga tradición. La concentración de puntos inventariados es también notable en otras

áreas de la región como algunos tramos de Pirineo, el cauce del río Cinca, la llanura del Ebro en el entorno de la ciudad de Zaragoza, el valle del río Jalón, el margen oriental de las comarcas del Jiloca y del Campo de Daroca, y las serranías ibéricas de Albarracín y Javalambre. Por el contrario, otros territorios de la Comunidad Autónoma aragonesa, localizados principalmente en la provincia de Huesca, se hayan prácticamente desprovistos de cualquier tipo de recurso inventariado. Quizás, el ejemplo más destacable sea el caso del área pirenaica más occidental, en el norte de la comarca de la Jacetania, donde en más de 500 km<sup>2</sup> no se ha registrado ningún elemento en la base de datos.

Esta distribución irregular de los datos inventariados también tiene su reflejo a nivel provincial y comarcal. Teruel, con 2.270 elementos, es la provincia con un mayor número de puntos registrados en la geodatabase, englobando el 45% del total. Le sigue de cerca la provincia de Zaragoza, con un 40%. A mucha diferencia de ambas se sitúa la provincia oscense, en la que el número de puntos inventariados fue, tan solo, de 775 (15%).

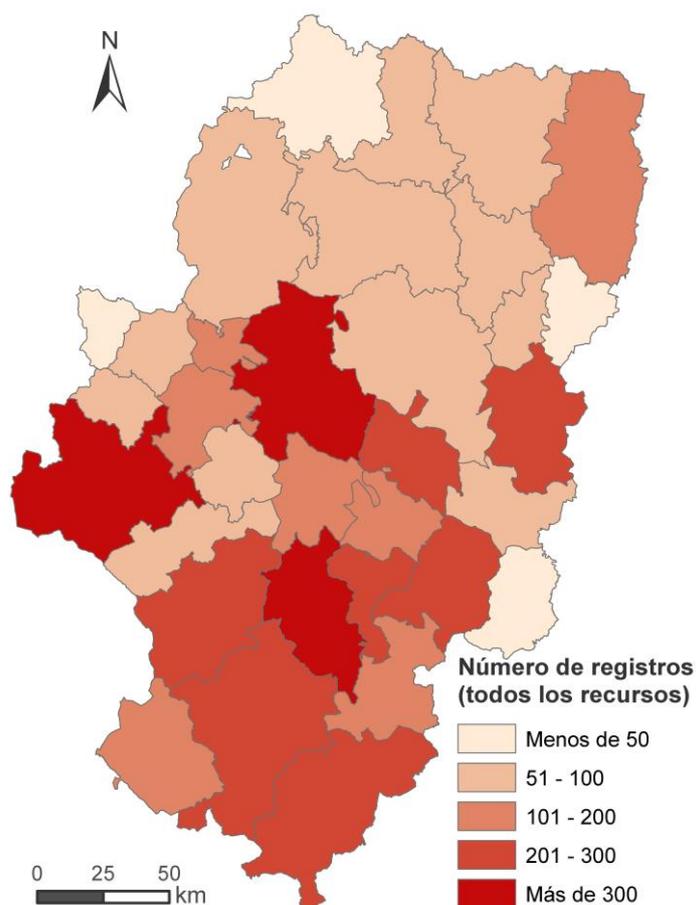


Figura 3.16. Número de elementos inventariados por comarca. Elaboración propia.

De las diez comarcas con un mayor número de puntos inventariados (Figura 3.16.), seis pertenecen a la provincia de Teruel, tres a la de Zaragoza y solo una, el Bajo Cinca, se encuentra en territorio oscense. En términos absolutos, las Cuencas Mineras en Teruel, con 467 elementos registrados, la Denominación Comarcal de Zaragoza (368) y la Comunidad de Calatayud, con 364, son las únicas tres comarcas en las que el número de elementos presentes en la base de datos supera los 300.

Así como la distribución en el territorio de los puntos recogidos en el inventario es muy irregular, el número de elementos que alberga cada grupo de recursos también muestra unas diferencias importantes (Figura 3.17.), que van desde los 44 elementos incorporados al grupo de las aguas hasta los más de 2200 en el relativo a las rocas industriales. En el resto de los grupos, el número de elementos incorporados es más semejante, siendo el más numeroso el que engloba los recursos energéticos (806), seguido por los minerales metálicos (791), los minerales industriales (615) y las rocas ornamentales (534).

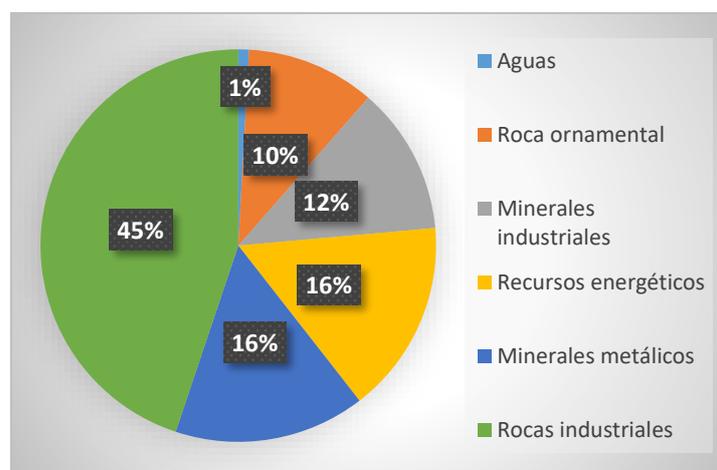


Figura 3.17. Porcentaje de registros del inventario por grupo de recursos. Elaboración propia.

Antes de pasar al análisis individual de cada uno de los grupos en los que se han dividido los recursos de la comunidad, conviene advertir de que algunos de los elementos incorporados presentan nombres muy parecidos y que, probablemente, podrían haber sido agrupados dentro de una misma categoría (p.e.: calizas, caliza de uso industrial, piedra caliza), sin embargo, se determinó más oportuno mantener la nomenclatura original procedente de las fuentes consultadas. También hay que puntualizar que la presentación de los grupos de recursos se realizará en función de su estado de actividad, uno de los

indicadores empleados en el análisis. Las categorías que lo componen, que serán analizadas en profundidad en los próximos apartados de la tesis, son importantes para comprender si los puntos incorporados se refieren a explotaciones actuales (*en explotación*), derechos mineros (*con derechos otorgados*), antiguas minas o canteras que no se están explotando en el momento (*potencialmente recuperables*), indicios, concesiones de exploración infructíferas (*descartados*) o registros del inventario localizados en áreas que se han considerado no aptas para el desarrollo de la actividad minera (*descartables*).

### 3.3.1. Aguas

El grupo que conforman los diversos tipos de agua explotados o potencialmente explotables en Aragón es, con mucha diferencia, el que cuenta con un número menor de elementos registrados en la base de datos generada. El carácter renovable del producto, siempre que su explotación se ejecute de una forma responsable, es la característica principal por la que se decidió que este grupo fuera analizado de una forma independiente. Como se verá en el Capítulo IV de la tesis, la forma de analizar el impacto local en la economía local, indicador englobado en la dimensión *inserción socioeconómica*, será diferente a la del resto de recursos. Ligado a esta característica, en la dimensión *aptitud del terreno* será incorporado un indicador exclusivo para las aguas que trata de valorar la capacidad de recarga del acuífero que nutre las potenciales explotaciones de agua.

Este grupo de recursos congrega cuatro tipos de aguas explotadas en la región (Figura 3.18.). Dos de estos ellos fueron ya definidos en la Ley 22/1973, de 21 de julio, de Minas, donde se consideraban *aguas minero-medicinales* a aquellas alumbradas natural o artificialmente y que por sus características y cualidades hayan sido declaradas de utilidad pública, mientras que las *aguas termales* fueron definidas como aquellas cuya temperatura de surgencia sea superior en cuatro grados centígrados a la media anual del lugar donde se alumbren (Jefatura del Estado, 1973).

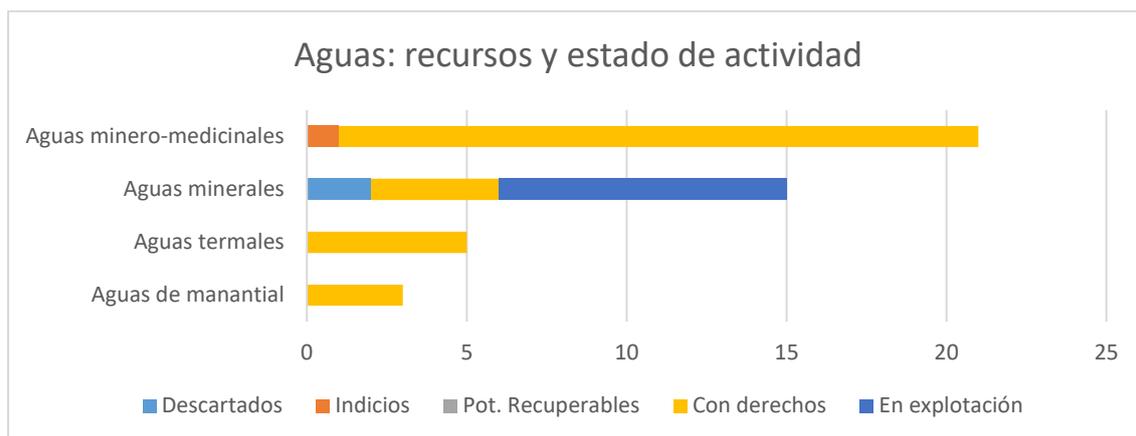


Figura 3.18. Número de elementos registrados por tipo y estado de actividad para el grupo de las aguas.

Las aguas embotelladas, por su parte, se rigen por el Real Decreto 1074/2002, de 18 de octubre, por el que se regula el proceso de elaboración, circulación y comercio de aguas de bebidas envasadas. En este Real Decreto se establece que las *aguas minerales naturales* son aquellas bacteriológicamente sanas que tienen su origen en un estrato o yacimiento subterráneo y que brotan de un manantial en uno o varios puntos de alumbramiento, naturales o perforados (Ministerio de la Presidencia, 2008). Las *aguas de manantial* son aguas potables de origen subterráneo que emergen espontáneamente en la superficie de la tierra o se captan mediante labores practicadas al efecto con las características naturales de pureza que permiten su consumo.

Por tipo de recurso, las aguas minero-medicinales son las que cuentan con un mayor número de elementos incorporados en la base de datos, coincidentes, en su práctica totalidad, con derechos mineros. También dominan los derechos mineros en las aguas termales y las aguas de manantial. Existen en el territorio, asimismo, numerosas explotaciones destinadas al aprovechamiento de aguas minerales, cifra que podría aumentar al existir varios derechos mineros que podrían desembocar en nuevos aprovechamientos efectivos a corto-medio plazo.

Cabe destacar que entre la información suministrada por los técnicos del Gobierno de Aragón sobre las explotaciones activas del territorio, no se incluían datos sobre los recursos que componen el grupo de las aguas. Por este motivo, para diferenciar los derechos mineros registrados en el catastro en los que existe un aprovechamiento efectivo del recurso de aquellos en los que no, debieron ser consultadas otras fuentes de información, como las

publicadas por las propias empresas que operan en el sector. De este modo, si no se encontraron datos que demostraran el aprovechamiento actual del recurso, el elemento inventariado quedó registrado dentro de la categoría denominada *con derechos otorgados o en tramitación*.

Desde el punto de vista espacial, exactamente la mitad de los 44 puntos inventariados en la comunidad para recursos relacionados con los diferentes tipos de aguas se localizan dentro de la provincia de Zaragoza. Teruel, con tan solo 9 registros (20%), presenta el valor más bajo, mientras que la provincia de Huesca engloba un 30% del total.

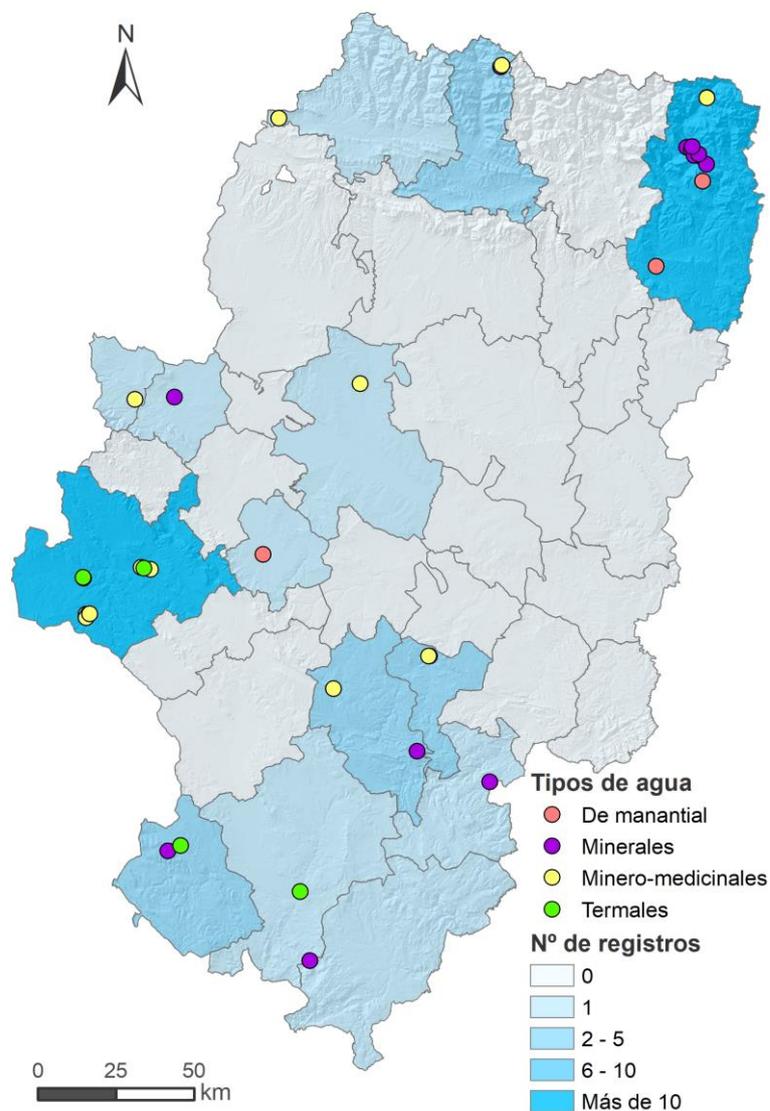


Figura 3.19. Distribución de los recursos inventariados pertenecientes al grupo de las aguas. Elaboración propia.

La localización de los puntos registrados en el inventario como explotaciones, derechos mineros o indicios relacionados con los diferentes tipos de aguas va a estar fuertemente vinculada con la presencia de un acuífero que los nutra. La mayoría de las masas de agua subterránea de la región aragonesa se localizan bajo los grandes relieves montañosos de la comunidad (Figura 3.19.), con la excepción de los aluviales de la depresión del Ebro. Así, todas las explotaciones de aguas en la comunidad van a estar localizadas dentro de los dominios de las cordilleras ibérica o pirenaica o en sus somontanos, con la excepción de un indicio de aguas minero-medicinales en el aluvial del río Gállego, cerca de la localidad de Zuera (Zaragoza).

En dos comarcas, concretamente en La Ribagorza y en la Comunidad de Calatayud, se concentran más del 50% del total de los registros concernientes a aguas. En la Comunidad de Calatayud son numerosos los derechos mineros otorgados para aguas termales y minero-medicinales en localidades como Jaraba, Alhama de Aragón o Paracuellos de Jiloca, que han derivado en su aprovechamiento como aguas de balneario. En La Ribagorza, por su parte, dominan las aguas minerales, que son embotelladas y comercializadas bajo diversas marcas.

### 3.3.2. Rocas industriales, minerales industriales y rocas ornamentales

Aunque no existe una definición única para las rocas y minerales industriales, la propuesta por Bates (1975) goza de una amplia aceptación: *cualquier roca o mineral de origen natural con valor económico, excluyendo los minerales metálicos, los energéticos y las gemas* (Kogel, Trivedi, Barker, y Krukowski, 2006). Esta definición incluye una fracción importante de los minerales y rocas empleados en los sectores de la construcción y de la industria.

Los minerales y las rocas industriales son empleados en la fabricación de muchos productos como cerámicas, plásticos, papel, cemento y materiales refractarios, así como en la construcción de viviendas e infraestructuras (Kogel et al., 2006). Estos autores proponen una clasificación basada en el uso final de las rocas y los minerales industriales, dividiéndolos en:

1. Materiales de construcción
2. Materias primas para la industria cerámica
3. Materias primas para la fabricación de materiales refractarios.
4. Materias primas para la industria química y la fabricación de fertilizantes.
5. Otros usos.

La importancia de este sector en nuestro país es innegable. España es, por ejemplo, el tercer productor mundial de roca ornamental tras China e Italia (Regueiro y González Barros y Marchán Sanz, 2004). Sin embargo, estos mismos autores apuntan que las dificultades para el acceso al suelo, las restricciones de carácter ambiental y la lentitud en los procesos administrativos impiden el mayor desarrollo de esta industria en nuestro país.

En el análisis del interés minero de los puntos inventariados, que será explicado detalladamente en el Capítulo IV, los pesos otorgados a los indicadores empleados serán similares tanto para las *rocas y minerales industriales*, como para las *rocas ornamentales*, y serán a su vez diversos de los utilizados para valorar el potencial de las *aguas*, de los *minerales metálicos* y de los *recursos energéticos*. La separación en tres grupos diferentes estará más relacionada con la elevada variedad de recursos y con la gran cantidad de elementos incorporados a la base de datos, que con una respuesta diversa ante la actividad minera.

De los tres tipos de recursos que forman parte de este gran grupo de análisis, cuyas características individuales serán analizadas en los subcapítulos posteriores, las rocas industriales son las que cuentan, con mucha diferencia, con un mayor número de elementos incorporados en la base de datos (66%). Las rocas ornamentales y los minerales industriales cuentan con un número similar de entidades registradas, siendo ligeramente mayor en este último grupo (18%).

### ROCAS ORNAMENTALES

Las rocas ornamentales son aquellas que por su especial dureza, durabilidad, belleza o color pueden ser utilizadas como materiales de construcción, elementos de ornamentación, arte escultórico, objetos artísticos, etc. En Aragón son siete los tipos de rocas extraíbles con

finos ornamentales. El alabastro es el recurso que cuenta con un mayor número de registros dentro de la base de datos, correspondiéndose la inmensa mayoría con canteras potencialmente recuperables (Figura 3.20.). Se trata de una variedad textural del yeso que, por su compacidad y escasez de impurezas, es interesante para la labra y talla ornamental de objetos decorativos (Rubio Navas et al., 2012). En el momento de la construcción de dicha base de datos existían 13 explotaciones activas de este recurso.

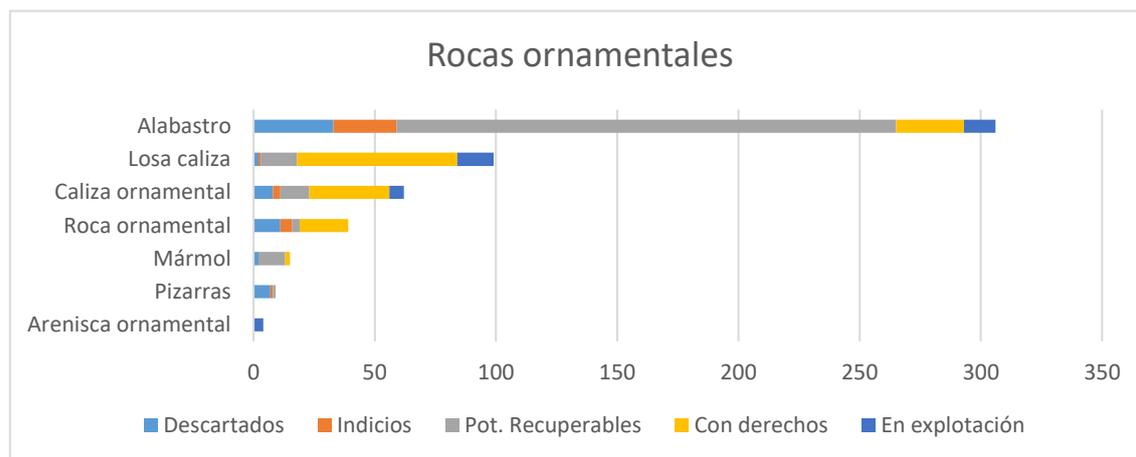
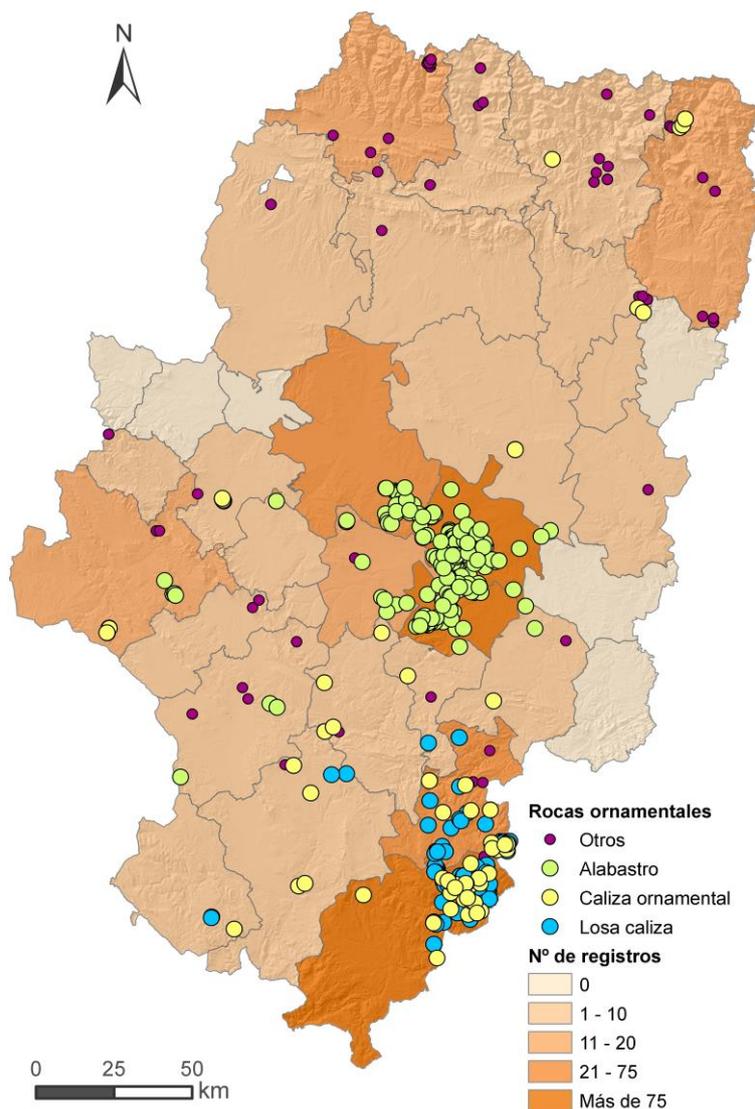


Figura 3.20. Número de elementos registrados por tipo y estado de actividad para el grupo de las rocas ornamentales. Elaboración propia.

Las explotaciones activas de calizas con finalidad ornamental, tanto las que han sido recogidas como losa caliza, como bajo la denominación de caliza ornamental, son relativamente más abundantes que las de alabastro, alcanzando la cifra de 21. Los derechos mineros de este material, que podrían desembocar en nuevas explotaciones del recurso, son también muy numerosos. Dentro de estos grupos se incluyen productos de gran calidad y trayectoria histórica en la región, como la Caliza marmórea de Abanto, la Caliza crema del Maestrazgo o el Travertino Nogal Montoro. Además del alabastro y de la caliza explotada con fines ornamentales, también existen dentro de la comunidad cuatro explotaciones de arenisca ornamental, que se localizan dentro del contexto territorial de las Sierras Exteriores pirenaicas.

Casi la mitad de los elementos inventariados dentro de la base de datos referentes a rocas ornamentales se localizan dentro de la provincia de Teruel, consistiendo, en su gran mayoría, en derechos mineros y explotaciones de caliza ornamental y losa caliza localizados en las sierras ibéricas de Gúdar y del Maestrazgo. El elevado número de registros

inventariados correspondientes a antiguas canteras de alabastro en la ribera baja del Ebro, aumenta considerablemente el porcentaje de puntos del inventario pertenecientes a la provincia de Zaragoza (42% del total).



*Figura 3.21. Distribución elementos registrados correspondientes al grupo de las rocas ornamentales. Elaboración propia.*

La distribución en el territorio de los recursos que componen el grupo de las rocas ornamentales va a estar muy influenciada por el ambiente genético (Figura 3.21.). Así, por ejemplo, el alabastro, formado por procesos sedimentarios relacionados con la precipitación de compuestos químicos, se localiza de forma masiva en la cuenca del Ebro. Esta cuenca

actuó largos periodos de la historia geológica como un sistema endorreico que recibía continuos aportes continentales y en la que, en las zonas más distales, dominaba una sedimentación fundamentalmente evaporítica (Peña y Lozano, 2004), dando lugar a potentes depósitos de yesos y sales.

Por otra parte, el color y las propiedades físicas de la caliza del Maestrazgo favorecen su utilización como piedra ornamental, lo que implica una gran concentración de canteras y derechos mineros en esta sierra de la Cordillera Ibérica, así como en la vecina sierra de Gúdar. Otras rocas empleadas como piedra natural, como el mármol y las pizarras, tienen un origen metamórfico, por lo que estarán ligadas a áreas con una historia geológica más compleja.

### ROCAS INDUSTRIALES

Las rocas industriales abarcan un abundante grupo de recursos empleados principalmente en la construcción de edificios e infraestructuras. Los áridos, las gravas, los basaltos y parte de las arenas, calizas, dolomías, ofitas, cuarcitas y otras rocas extraídas en la región aragonesa se destinarán a la construcción de edificios residenciales y oficiales, en la creación y mantenimiento de carreteras, del balasto de las vías del tren, y de otras infraestructuras.

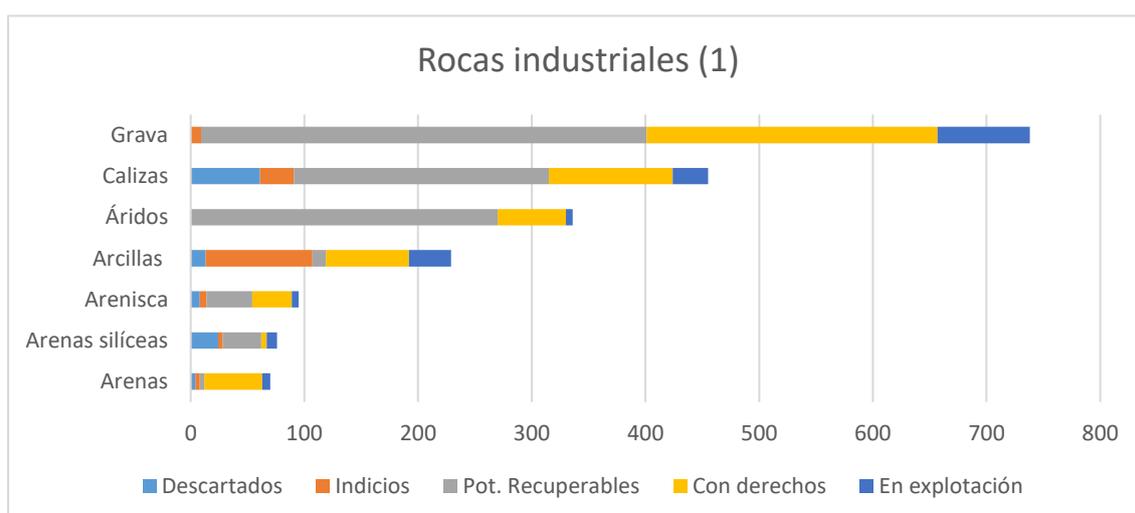


Figura 3.22. Número de elementos registrados por tipo y estado de actividad para las rocas industriales con un mayor número de elementos inventariados. Elaboración propia.

Las gravas son el recurso que cuenta con un mayor número de registros en la base de datos (Figura 3.22.), la mayoría correspondientes a antiguas canteras ya abandonadas, sin embargo, las explotaciones activas de grava son las más abundantes dentro del grupo de las rocas industriales. Tras las gravas, las explotaciones activas de arcillas y calizas son las más numerosas. También existen labores que en la actualidad que extraen áridos, areniscas, arenas y arenas silíceas.

Existen numerosas explotaciones activas de recursos del grupo de las rocas industriales con una menor tradición en el territorio que las nombradas en el párrafo anterior, atendiendo al escaso número, o incluso a la ausencia, de elementos catalogados como potencialmente recuperables (Figura 3.23.). Entre estos recursos pueden ser incluidas las arcillas caoliníticas, la calcarenita o las gravas silíceas. El elevado número de derechos mineros otorgados a recursos como las ofitas o las arcillas refractarias podrían significar el aumento de las canteras destinadas al aprovechamiento de este tipo de materiales en un futuro no muy lejano.

Las rocas industriales son el grupo de recursos que cuenta con un mayor número de elementos registrados dentro de la base de datos generada. Gran parte de estos elementos se localizan en la provincia de Zaragoza (42%). Cabe destacar que el precio de los productos catalogados dentro de este grupo de recursos (especialmente el de las gravas y áridos) es relativamente bajo y las explotaciones se localizan en la proximidades de los centros de consumo. Siendo Zaragoza, con mucha diferencia, la provincia más poblada, es lógico que la mayoría de las canteras y derechos mineros de este tipo de recursos se localicen dentro de su extensión.

Esta tendencia se invierte en la provincia de Teruel, que engloba el 38% de los registros inventariados pero cuya población solo supera ligeramente el 10% del total aragonés. La explicación a este hecho radica en los importantes depósitos de varios tipos de arcillas, y en que parte de su extracción se exporte a otras provincias, como Castellón o Tarragona, o incluso se destine a la producción de pastas cerámicas en Italia y Portugal (*El sector de las arcillas en la provincia de Teruel*, 2006).

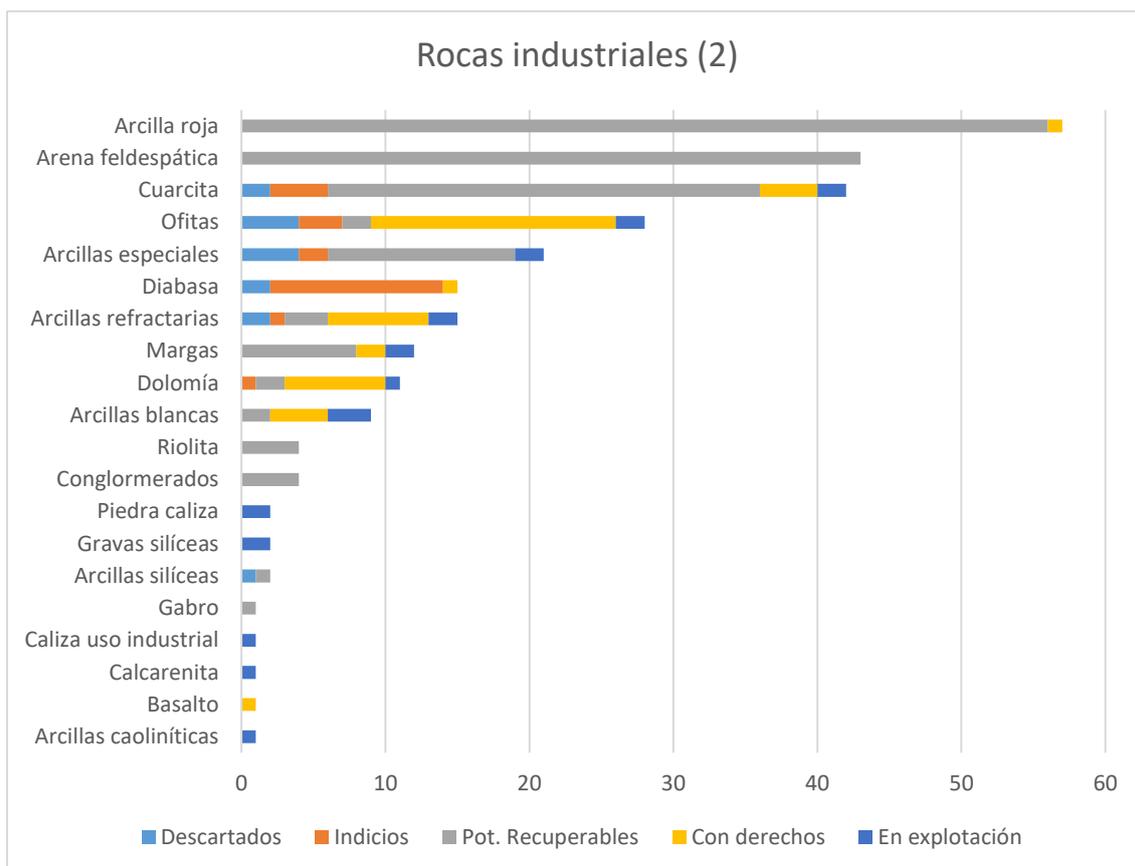


Figura 3.23. Número de elementos registrados por tipo y estado de actividad para el resto de recursos englobados dentro de las rocas industriales. Elaboración propia.

La distribución espacial de los puntos inventariados referentes a rocas industriales es mucho más homogénea que la de otros recursos, especialmente en los dominios de la Cordillera Ibérica (Figura 3.24.). No obstante, este reparto está fuertemente marcado por la localización de los puntos correspondientes a gravas, calizas y áridos. Estos recursos, de precios bajos y empleados fundamentalmente en la construcción, se localizan, preferentemente, cerca de los centros de consumo. Por otra parte, las gravas, recurso que cuenta con un mayor número de registros, así como las arenas, suelen estar ligadas a los ríos, extrayéndose de sedimentos procedentes de las llanuras de inundación y valles de fondo plano, terrazas aluviales y glacis, cono de deyección o coluviones localizados en zonas interfluviales (*Explicación del Mapa de Rocas y Minerales Industriales de Aragón. E. 1:300.000, 1996*). Por otra parte, los principales núcleos de población tienden a localizarse en los valles de los ríos, donde la topografía es más amable y el agua abundante. Ambos factores condicionan que la gran mayoría de los puntos inventariados correspondientes a canteras y derechos mineros de estos tipos de recursos se localicen en los valles de los

grandes ríos, especialmente en el del Ebro, aunque también en otros como los del Aragón, Arba, Gállego, Jalón, Alcanadre, Cinca, Jiloca, Matarraña y Guadalope (*Explicación del Mapa de Rocas y Minerales Industriales de Aragón. E. 1:300.000, 1996*). Esta concentración de elementos registrados en torno a los cauces de los principales ríos es especialmente notable en la margen izquierda del río Ebro, en gran parte, porque el número de registros que simbolizan otros tipos de rocas industriales es muy escaso.

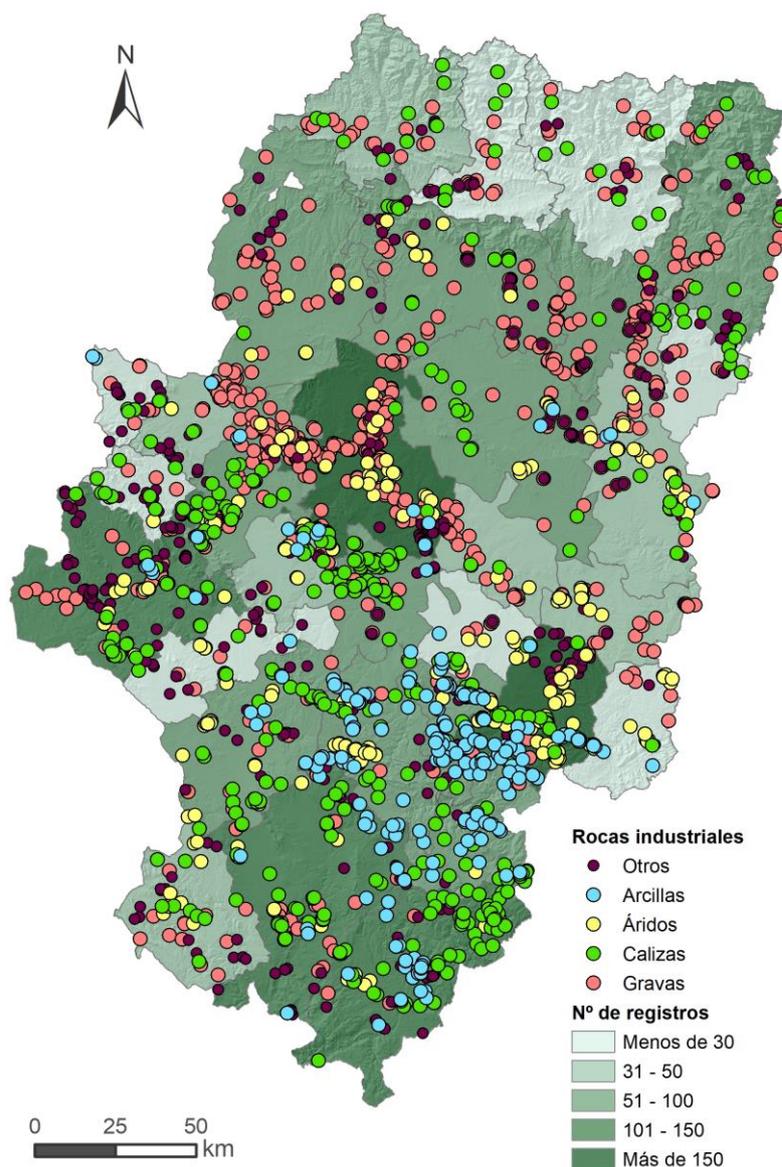


Figura 3.24. Distribución elementos registrados correspondientes al grupo de las rocas industriales. Elaboración propia.

No es, por tanto, extraño que la Delimitación Comarcal de Zaragoza sea la que cuente con un mayor número de yacimientos de rocas industriales inventariados, o que las

comunidades de Calatayud y Teruel ocupen la tercera y la quinta posición, respectivamente. Los importantes depósitos de arcillas localizados entre los ríos Gadalope y Martín hacen que el Bajo Aragón sea la segunda comarca por número de registros de rocas industriales, mientras que la de Gúdar-Javalambre ocupa la cuarta posición, si bien en este caso las calizas son el recurso dominante.

A diferencia de lo que ocurría con el resto de grupos en los que se han dividido los recursos, todas las comarcas aragonesas van a contar con algún elemento referente a rocas industriales registrado en la base de datos. La Litera, en Huesca, con 18 elementos inventariados, y Tarazona y El Moncayo y Aranda (ambas en la provincia de Zaragoza), con 21 y 24, respectivamente, son las comarcas con un menor número de registros.

### MINERALES INDUSTRIALES

Este tipo de minerales son utilizados en numerosos procesos industriales y como materia prima para la fabricación de diversos tipos de productos. Por ejemplo, el cuarzo y el granate pueden ser empleados como abrasivos; y el yeso y la anhidrita, junto con la caliza y algunos tipos de arcillas, forman parte del proceso de fabricación del cemento. Asimismo, estos minerales son utilizados en industrias como la farmacéutica, la cosmética, la siderurgia y en la fabricación de piensos, jabones, papel, pintura o plástico, entre muchos otros ejemplos.

De los 35 tipos de minerales industriales registrados en la comunidad aragonesa (Figura 3.25.), los que van a contar con un mayor número de elementos incorporados en la base de datos van a ser el yeso, con más de 180 registros, el caolín (122), la sal común (84) y la sal gema (36). De todos estos es el yeso el que presenta un mayor número de explotaciones activas en el momento actual, con un total de 8. El carbonato cálcico, a pesar de ser un recurso pocas veces nombrado como tal en las fuentes consultadas, cuenta con tres labores dedicadas a su obtención, además de un derecho minero otorgado.

Las provincias de Zaragoza y de Teruel (42%) cuentan con un número de elementos inventariados referentes a minerales industriales similar, y muy superior al que presenta la provincia de Huesca (16%). Aunque también se extraen, se han extraído, o existen derechos para una potencial extracción de yesos en algunas áreas del Sistema Ibérico, como el valle

del Jalón o la comarca del Jiloca, así como en el somontano pirenaico, la mayor concentración de yacimientos de yeso va a estar localizada en el sector central del valle del Ebro. Como ya se vio en párrafos anteriores, su configuración como cuenca endorreica durante largos periodos de tiempo condicionó la deposición de potentes capas de rocas evaporíticas. De este modo, los yesos y las sales serán los recursos más abundantes en el sector central de región aragonesa.

Por su parte, los minerales industriales localizados en los ramales montañosos de la Cordillera Ibérica son mucho más variados y, aunque son numerosos los registros referentes al yeso y a diversos tipos de sales, en estas áreas aparecen incluso minerales como el espato-flúor, elemento considerado como crítico por la Unión Europea. Sin embargo, el caolín es el recurso predominante en las áreas nombradas, haciendo que este mineral sea el más abundante entre los registros inventariados en la provincia de Teruel.

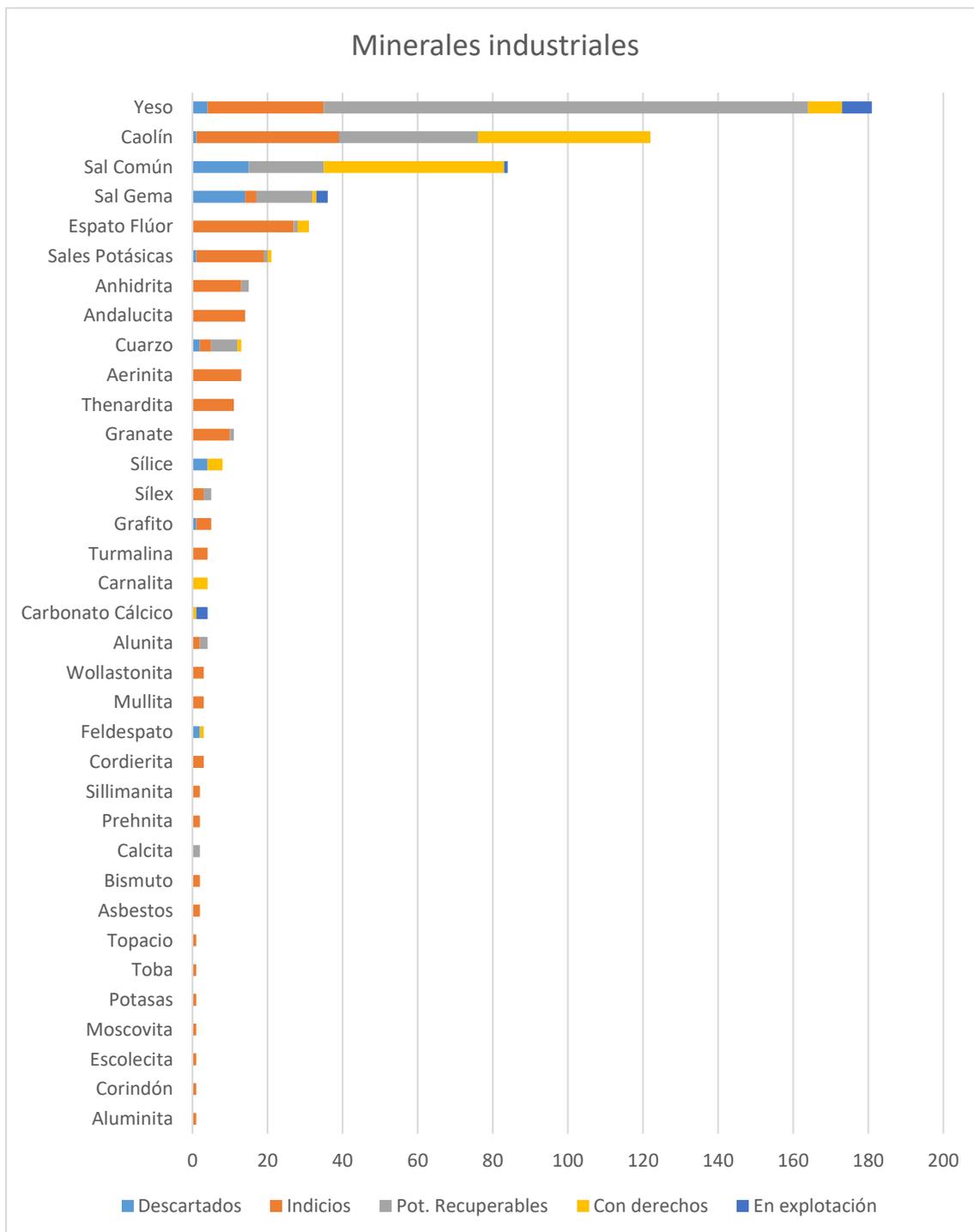


Figura 3.25. Número de elementos registrados por tipo y estado de actividad para el grupo de los minerales industriales. Elaboración propia.

A pesar de contar con relativamente pocos elementos registrados en su territorio, algunos de los recursos que componen el grupo de minerales industriales solo han sido localizados en la provincia de Huesca. Entre ellos se encuentran la aerinita, un silicato empleado como pigmento azul, de la que se tienen indicios en áreas de las sierras exteriores

del Pirineo entre las comarcas de La Ribagorza y La Litera, y los asbestos, localizados en el Pirineo Axial.

La distribución en el territorio aragonés de los minerales industriales localizables en la región va a estar fuertemente condicionada por su génesis (Figura 3.26.). De esta forma, la mayor parte de los puntos inventariados correspondientes a yesos, sal común, sal gema y otros tipos de sales van a estar localizados en la depresión del Ebro, y en menor medida, en la del Jalón. Aunque es común la presencia de registros de rocas evaporitas en otras zonas de la región, como la Cordillera Ibérica o las Sierras Exteriores, los volúmenes serán mucho más limitados. Los minerales industriales cuya formación ha estado condicionada a la actuación de los procesos analizados al principio de este capítulo, responsables de la concentración de los elementos químicos que se encuentran dispersos en algunos puntos concretos de la corteza terrestre, presentan alineaciones muy claras. En el caso de la Ibérica los registros correspondientes a estos recursos forman dos líneas muy marcadas de orientación NW-SE, localizadas al norte y al sur de la depresión de Teruel-Calatayud, coincidiendo con los ramales aragonés y castellano del Sistema Ibérico. En el Pirineo y las Sierras Exteriores, la distribución de los puntos del inventario también sigue una alineación coincidente con la orientación predominante de la cordillera pirenaica, es decir, Este-Oeste.

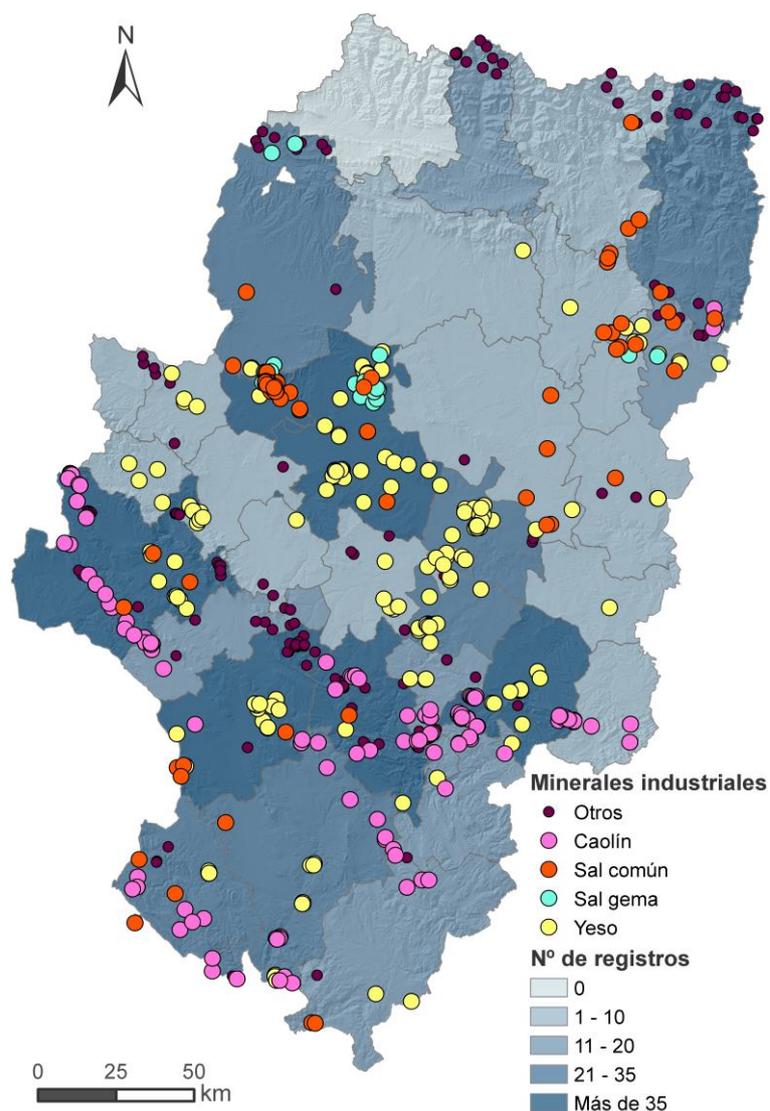


Figura 3.26. Distribución elementos registrados correspondientes al grupo de los minerales industriales. Elaboración propia.

A nivel comarcal son la Comunidad de Calatayud, la D.C. de Zaragoza, la Ribera Alta del Ebro, el Bajo Aragón y el Jiloca las que cuentan con un mayor número de registros referentes a este tipo de recursos. En todas ellas, con excepción de la Comunidad de Calatayud donde el caolín es el recurso más veces inventariado, dominan los yesos y los diferentes tipos de sales. En el extremo opuesto, la comarca de La Jacetania no cuenta con ningún mineral industrial inventariado en la base de datos, mientras que la Hoya de Huesca cuenta solo con una antigua labor de yeso en su territorio.

### 3.3.3. Minerales metálicos

Los minerales metálicos contienen uno o más elementos de interés económico. En ocasiones, se encuentran concentrados de forma natural constituyendo yacimientos minerales, pero su presencia en la naturaleza es rara. Tras su explotación minera estos minerales deben de ser sometidos a procesos destinados a extraer y concentrar el metal de interés económico en ellos contenido («Minéraux métallifères», 2019).

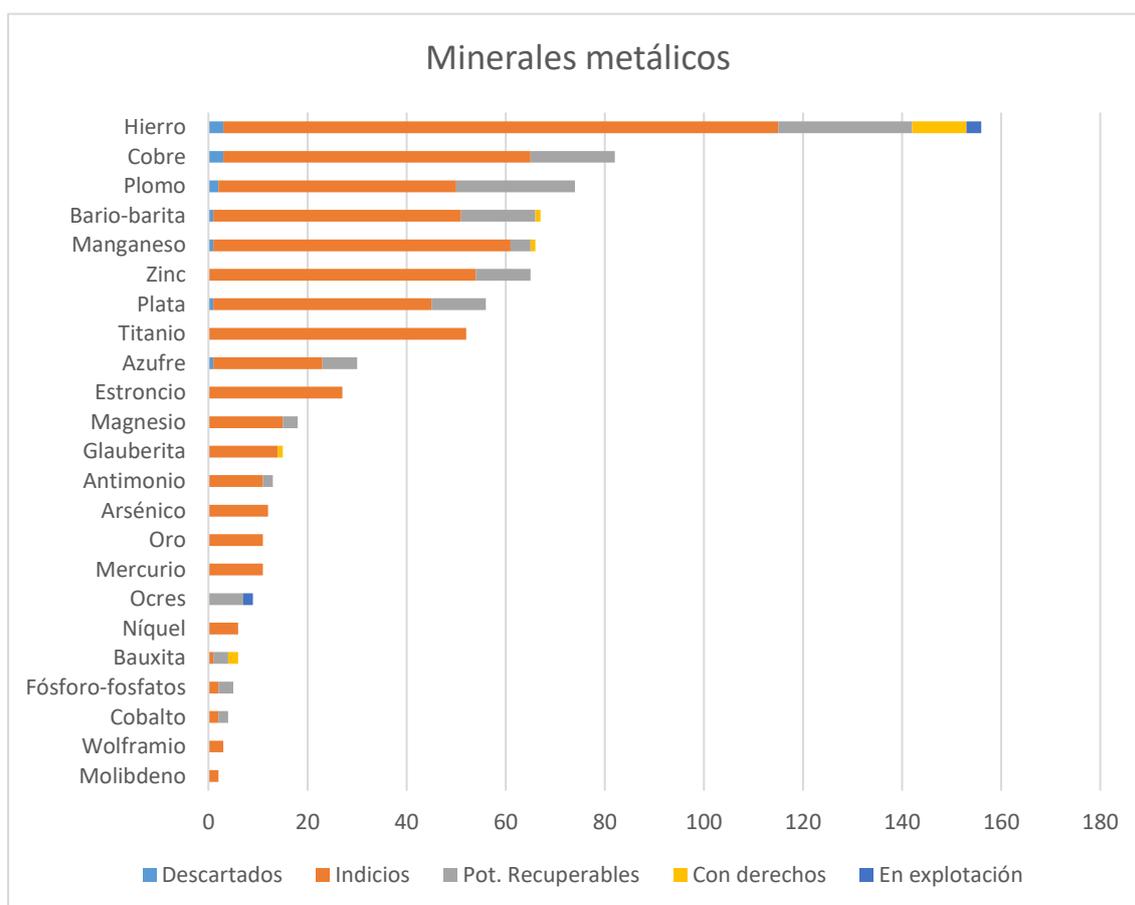


Figura 3.27. Número de elementos registrados por tipo y estado de actividad para el grupo de los minerales metálicos. Elaboración propia.

Dentro del grupo de los minerales metálicos se han incorporado 24 tipos de recursos diferentes (Figura 3.27.). Puesto que no todas las fuentes empleadas en la construcción de la base de datos incorporan información referente al mineral del que forma parte cada elemento registrado, se ha considerado oportuno registrar todos los minerales que contienen un determinado elemento en una única clase, que recibirá el nombre de dicho elemento. Así, por ejemplo, en las mineralizaciones de hierro de Sierra Menera, localizadas

en el municipio de Ojos Negros (Teruel), este elemento aparece formando parte de óxidos e hidróxidos de hierro, fundamentalmente goethita y limonita, mientras que en la zona del Moncayo y en la Sierra de Albarracín, la mena está formada casi exclusivamente por hematites (*La Minería de Aragón*, 1994), un óxido de hierro. Todos estos registros, más algunos otros pertenecientes a diversas áreas de la región, aparecerán englobados en la base de datos bajo el nombre genérico de hierro.

Es precisamente este elemento el que cuenta con un mayor número de registros dentro de la base de datos, además de ser el único que presenta, junto con los ocres, explotaciones activas en el momento actual. Los ocres son un tipo óxido de hierro que aparece frecuentemente mezclado con arcillas o arenas, presentando colores que van desde el amarillento al rojizo o marrón. Los ocres extraídos en Aragón no son destinados a la siderurgia, sino a la fabricación de pigmentos para pintura, colorantes para cementos, aditivos para el vidrio y en la manufactura de esmaltes y cerámicas. Por sus usos finales, deberían haber sido incluidos dentro de los minerales industriales, pero al tratarse la clasificación empleada en esta tesis de grupos de valoración ante la respuesta minera, se ha preferido mantenerlos dentro de los minerales metálicos.

El cobre y el plomo, segundo y tercer recurso por número de registros en el territorio, carecen de derechos mineros otorgados, por lo que no se espera la puesta en marcha de ninguna explotación en un futuro próximo. Sí que cuentan con derechos mineros otorgados la barita, el manganeso y la bauxita. Para el resto de minerales metálicos inventariados, la práctica totalidad de los registros coinciden con indicios de la presencia del metal en el territorio.

Casi la mitad de los elementos inventariados referentes a minerales metálicos se localizan dentro de la provincia de Teruel. Por su parte, la provincia de Zaragoza cuenta con 306 registros, casi el 40% del total, mientras que Huesca supera, ligeramente, los 100 elementos inventariados.

Con la excepción de algunas sales de elementos metálicos, como el sodio, el magnesio y el cobre, formadas por procesos sedimentarios evaporíticos y localizadas en la depresión del Ebro, el resto de los registros de minerales metálicos van a estar situados dentro de los

dominios montañosos de la comunidad. Su distribución espacial (Figura 3.28.) muestra una alineación preferente que coincide con la orientación de los sistemas montañosos en los que se localizan, es decir, E-O en los Pirineos y Sierras Exteriores y NO-SE en la Ibérica. Como en el caso de los minerales industriales, los minerales metálicos localizados en los dominios ibéricos, muestran dos alineaciones preferentes, una al norte y otra al sur del surco de Calatayud-Teruel.

A nivel comarcal, tres entidades aglutinan un número de registros extraordinariamente elevado. Estas tres comarcas son la Comunidad de Calatayud, con 127 elementos, en la provincia de Zaragoza, y la Sierra de Albarracín (97) y el Jiloca (92), en la de Teruel. Estas tres entidades administrativas acaparan casi el 40% del total de los elementos registrados en toda la región. En el extremo contrario, La Jacetania, el Somontano de Barbastro, el Cinca Medio, Los Monegros, el Bajo Cinca (todas ellas en la provincia de Huesca), la Ribera Baja del Ebro y el Campo de Belchite (en Zaragoza) y el Maestrazgo (Teruel), no poseen ningún tipo de yacimiento de minerales metálicos.

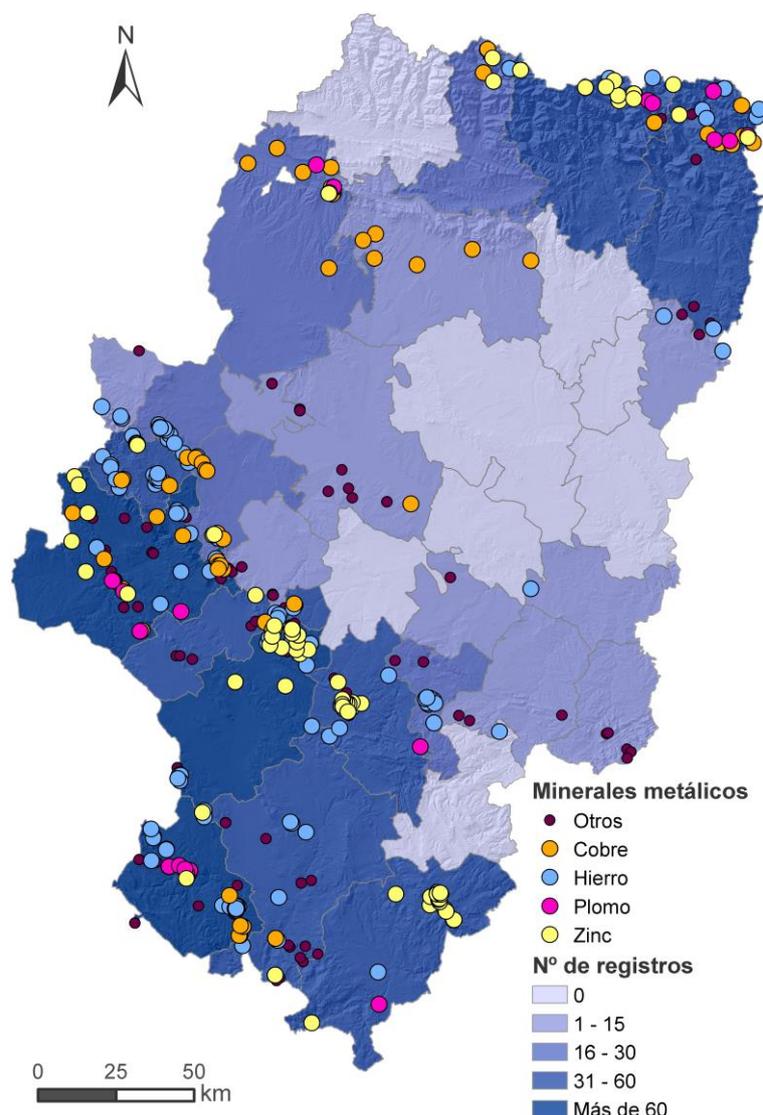


Figura 3.28. Distribución de los recursos inventariados pertenecientes al grupo de los minerales metálicos. Elaboración propia.

### 3.3.4. Recursos energéticos

Aragón cuenta con una amplia historia en lo que respecta a la minería del carbón, puesto que existen noticias sobre el aprovechamiento de este recurso en las cuencas turolenses de Utrillas-Aliaga y de Oliete-Andorra-Estercuel, ya entre los años 1760 y 1780 (Rubio Navas et al., 2012). Esta misma fuente apunta el inicio de la explotación de carbón en la cuenca carbonífera de Sallent de Gállego a finales del siglo XIX. La minería industrial del carbón aragonés comienza hacia 1917, en la Cuenca de Ariño. Estas explotaciones trajeron una bonanza económica a las comarcas en las que esta actividad era efectuada, incluyendo la zona del bajo Cinca, donde se pusieron en marcha numerosas concesiones ligadas a la

cuenca lignitífera de Mequinenza (Rubio Navas et al., 2012). Sin embargo, en las últimas décadas el número de explotaciones activas se ha reducido drásticamente.

Además del carbón, se han incorporado registros a la base de datos correspondientes a pizarras bituminosas y minerales radiactivos, concretamente, uranio y torio (Figura 3.29.). Las pizarras bituminosas, a veces nombradas como esquistos bituminosos, son rocas enriquecidas en hidrocarburos, en las que la materia orgánica permaneció atrapada en la roca madre (Oyarzún y Oyarzun, 2014). Existe constancia de la explotación de este recurso a principios del siglo pasado en las cercanías de Rubielos de Mora (Teruel). Los 22 indicios relativos a hidrocarburos no convencionales se corresponden con las muestras rocosas tomadas en el campo y enviadas a un laboratorio externo para analizar su potencial como generadoras de hidrocarburos. Sus peculiaridades y la distribución en el territorio de estas formaciones geológicas serán analizadas en un apartado independiente.

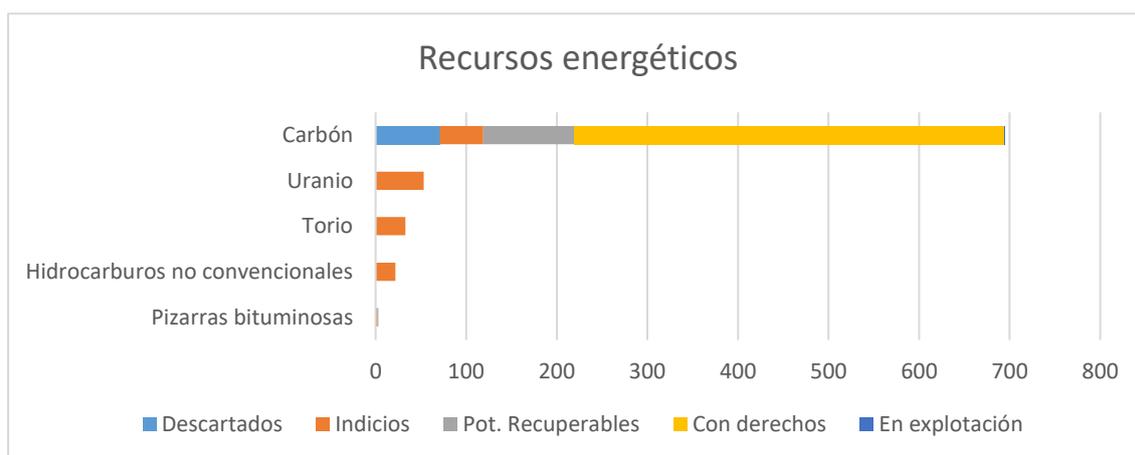


Figura 3.29. Número de elementos registrados por tipo y estado de actividad para el grupo de los recursos energéticos. Elaboración propia.

El carbón, con casi 700 puntos inventariados en la base de datos, es el recurso energético más abundante en la región. La mayoría de estas entidades se corresponden con derechos mineros otorgados o en trámite que podrían ser consideradas como explotaciones potenciales, si bien, solo existe en la actualidad una labor activa. Se trata de una explotación situada en el término municipal de Berge, localidad del Bajo Aragón turolense. Por otro lado, todos los puntos inventariados referidos a minerales radiactivos se corresponden con indicios, concretamente, 53 de uranio y 33 de torio. Finalmente, de los tres registros

dedicados a las pizarras bituminosas, dos se corresponden con indicios y uno coincide con una antigua labor extractiva.

Una gran parte de los registros inventariados correspondientes a recursos energéticos se localizan en la provincia de Teruel (64%). No en vano, solo en las cuencas carboníferas turolenses ya se sitúan más de la mitad del total de los elementos inventariados. La otra gran fuente de elementos inventariados referentes a recursos energéticos, la cuenca de Mequinenza, de la que proceden más del 30% de los elementos incorporados a la base de datos, se localiza entre las provincias de Huesca y Zaragoza. El hecho de que esta cuenca se extienda principalmente por la provincia de Zaragoza, condiciona que, a nivel regional, esta sea la segunda provincia con un mayor número de registros, con 222, frente a los 62 de la provincia oscense.

Como se comentó al principio de este capítulo, la formación de los depósitos de carbón se ve condicionada por la existencia de cuencas sedimentarias con unas características concretas que favorecen la acumulación y la conservación de materia orgánica de origen vegetal. Por este motivo, los registros de la base de datos referentes al carbón tenderán a estar concentrados en regiones concretas del territorio, más o menos extensas (Figura 3.30.).

Por otro lado se han inventariado indicios de uranio y torio en varios puntos de la región, muchos de ellos asociados con el lignito de la cuenca de Mequinenza. El IGME informa en la memoria de la Hoja 443 (Fabara) que en el momento de la realización del mapa geológico aún no se habían establecido ni el modelo mineralogénico, ni los parámetros técnicos y económicos para la recuperación de estos indicios, por lo que solo podrían considerarse un recurso potencial complementario a la explotación del carbón (IGME, 1997b).

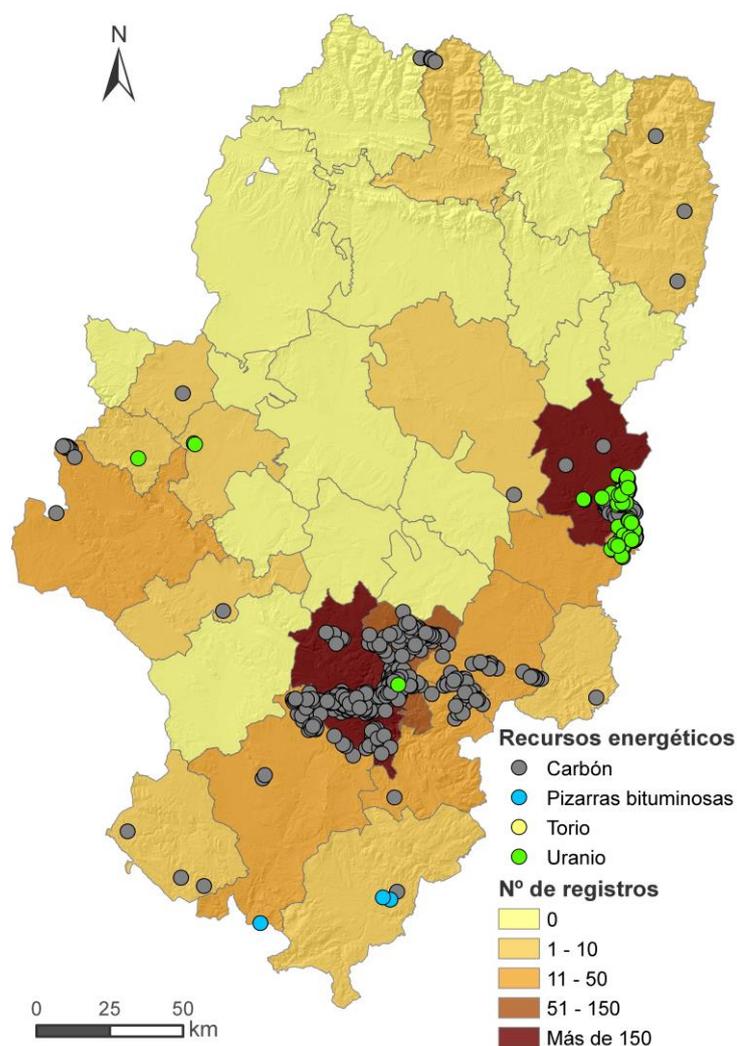


Figura 3.30. Distribución de los recursos inventariados pertenecientes al grupo de los recursos energéticos. Elaboración propia.

Las comarcas de las Cuencas Mineral (Teruel) y el Bajo Cinca (Huesca/Zaragoza), en las que se extienden las dos principales cuencas carboníferas de la región, van a contar con el número más elevado de elementos inventariados referentes a recursos energéticos. En otras comarcas próximas, y por las que también se extienden estas cuencas, el número de registros será igualmente elevado, si bien no alcanzan los valores de las dos primeras mencionadas. Por el contrario, en 15 comarcas aragonesas no existe ni un solo registro referido a recursos energéticos.

### 3.3.5. Hidrocarburos no convencionales

A pesar de pertenecer a los recursos energéticos, la distinta forma de adquisición de los datos y el hecho de que no hayan sido sometidos al mismo tipo de análisis, justifican su presentación como un grupo separado del resto. Los puntos inventariados no se corresponden con registros incluidos en obras bibliográficas, informes o bases de datos digitales, sino que dentro del proyecto *“Los recursos energéticos y el desarrollo territorial de Aragón. Análisis y propuestas en un nuevo escenario global”* financiado por el IUCA<sup>6</sup>, se seleccionaron una serie de afloramientos de algunas formaciones geológicas que se extienden por la región aragonesa y que son ricas en materia orgánica. Como se vio en el capítulo anterior, el elemento fundamental para la obtención de hidrocarburos empleando la técnica conocida como fractura hidráulica es la presencia de una roca madre, rica en materia orgánica, en la que el gas y petróleo potencialmente generado permanezca atrapado en dicha roca madre, debido a su baja permeabilidad.

---

<sup>6</sup> Instituto Universitario de Ciencias Ambientales



Figura 3.31. Distribución espacial de los afloramientos muestreados. Elaboración propia.

Tomando en consideración los criterios expuestos en el Capítulo II de la tesis, que relacionan ciertos paleoambientes sedimentarios con la capacidad de acumulación y preservación de la materia orgánica en las rocas, y con la ayuda del Dr. Aurell Cardona fueron seleccionados una serie de afloramientos de formaciones geológicas de la Cordillera Ibérica turolense para la toma de muestras, con el objetivo de analizar su potencial como rocas madre de hidrocarburos. Todas las muestras recogidas son de naturaleza margosa o pizarrosa, (exceptuando un nivel carbonoso de la *Fm. Escucha*) de colores grises a negros y de edades comprendidas entre el Silúrico y el Cretácico. Se trata, en todos los casos, de formaciones marinas, en ambientes que van desde la plataforma continental hasta medios transicionales de tipo deltaico o mareal.

Todos los afloramientos muestreados se localizan en la provincia de Teruel, con la excepción de una muestra de pizarras graptolíticas negras de edad silúrica tomada en la localidad de Checa (Figura 3.32.), en la provincia de Guadalajara (Castilla-La Mancha). La distribución espacial de estos afloramientos se muestra en la Figura 3.31.



*Figura 3.32. Afloramiento de la Fm. Pizarras de Checa en el término municipal de Checa, próximo a la carretera que une esta localidad con Orea, ambas en la provincia de Guadalajara. Fuente: Iván Polo (Checa, Guadalajara; 2015).*

Las muestras más antiguas tomadas se corresponden con pizarras negras del silúrico, de la *Formación Pizarras de Checa*, unidad equivalente a la *Fm. Bádenas* de la Rama Aragonesa del Sistema Ibérico. Esta formación fue muestreada en dos afloramientos situados en las localidades de Torres de Albarracín (Figura 3.34. y Figura 3.35.) y Checa (Guadalajara, Figura 3.33.). Son pizarras hojosas negras que corresponden a depósitos sedimentarios en condiciones de muy baja energía, en un medio reductor euxínico y muy ricas en materia orgánica (IGME, 1983a). Concretamente se tomaron 10 muestras en el afloramiento de Torres de Albarracín y 8 en el de Checa.

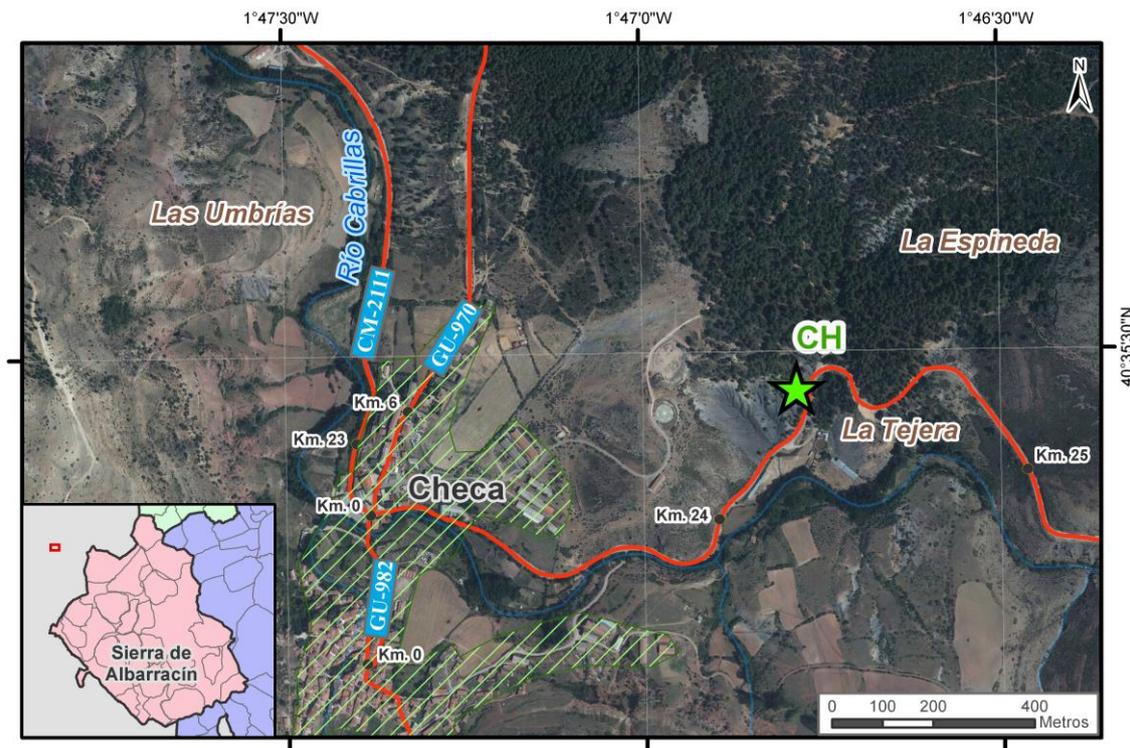


Figura 3.33. Localización del afloramiento de la Formación Pizarras de Checa en el término municipal de Checa (Guadalajara). Elaboración propia.



Figura 3.34. Afloramiento de la Fm. Pizarras de Checa en la carretera que une Torres de Albarracín con la localidad con Albarracín. Fuente: Iván Polo (Torres de Albarracín, Teruel; 2015).

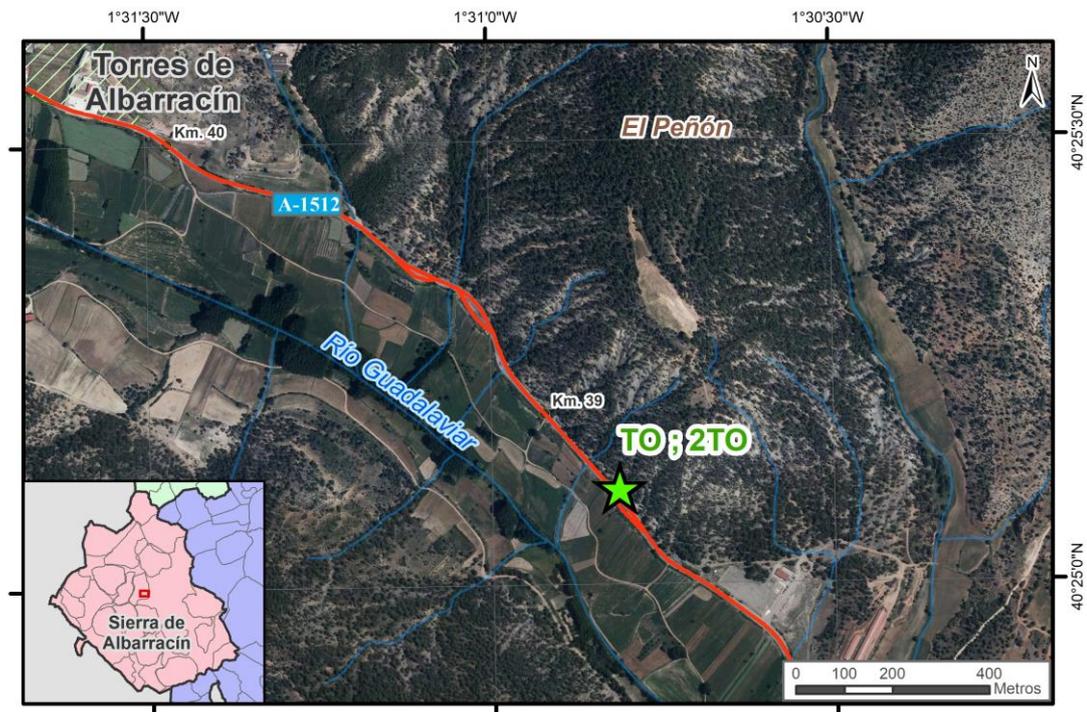


Figura 3.35. Localización del afloramiento de la Formación Pizarras de Checa en el término municipal de Torres de Albarracín (Teruel). Elaboración propia.

En el límite entre los municipios de Hoz de la Vieja y Montalbán se recogieron 6 ejemplares de distintos niveles de pizarras negras de la *Fm. La Hoz*. Se trata de pizarras depositadas en un gran delta, en las que se han encontrado fragmentos de plantas parecidas a los actuales helechos (Canudo, 2007), así como crinoideos y una importante fauna de *Goniatites* (Villena y Pardo, 1983).

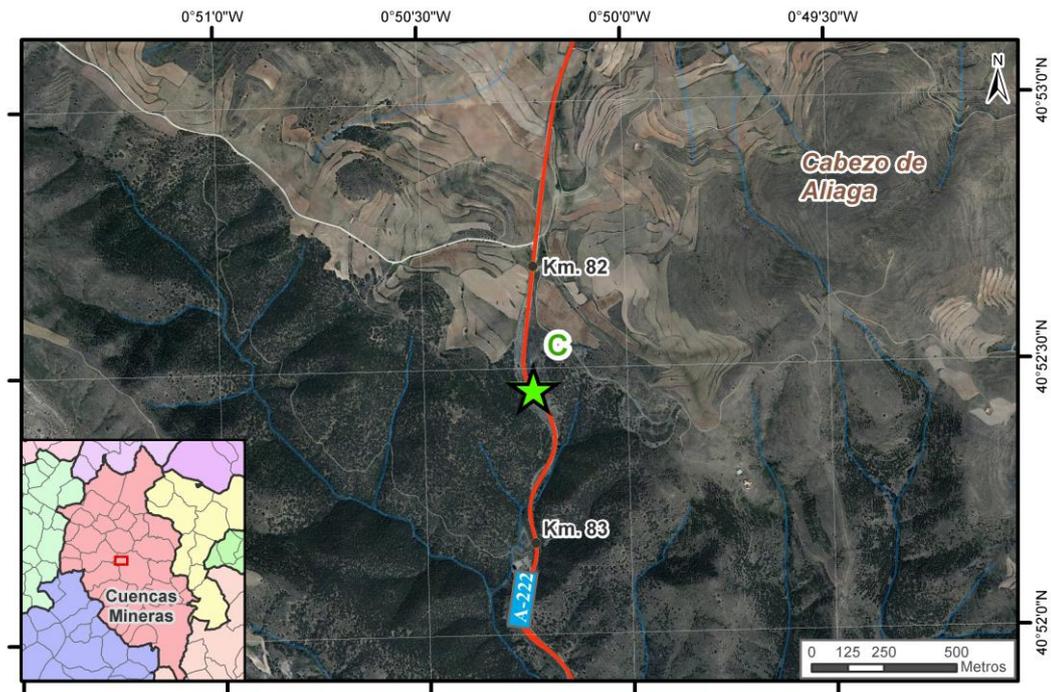


Figura 3.36. Localización del afloramiento de la Formación La Hoz en el término municipal de Montalbán (Teruel). Elaboración propia.

Dentro del Jurásico Inferior fueron muestreadas las formaciones *Cerro del Pez* y *Turmiel*. La más antigua, la *Fm. Cerro del Pez*, fue analizada en la localidad de Obón, en la comarca de las Cuencas Mineras (Figura 3.37.). Se tomaron 3 ejemplares procedentes de niveles de margas de color gris a verde claro, sedimentadas en un medio de rampa externa en condiciones de baja energía (Bordonaba y Aurell, 2002).

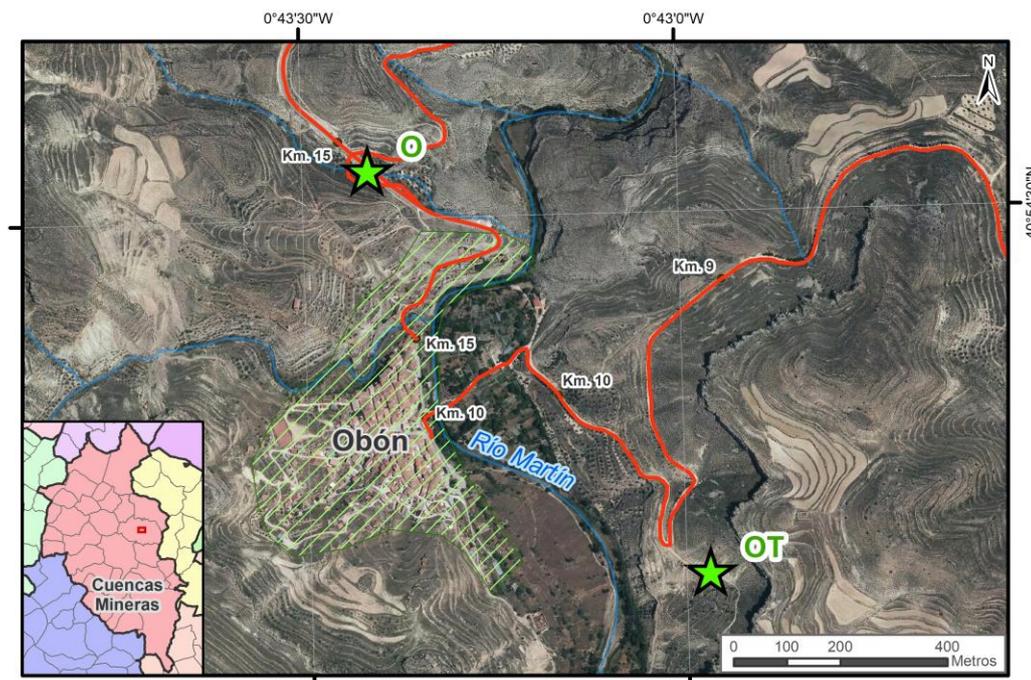


Figura 3.37. Localización de los afloramientos correspondientes a las formaciones Cerro del Pez (O) y Turmiel (OT) en el término municipal de Obón (Teruel). Elaboración propia.

Los afloramientos estudiados de la *Fm. Turmiel* se localizan en los términos municipales de Obón y Aguatón (Figura 3.38. y Figura 3.39.), este último situado en la comarca de la Comunidad de Teruel. Fueron recogidas 11 muestras en el afloramiento de Obón y 17 en el de Aguatón, correspondientes con margas depositadas en una plataforma marina relativamente profunda.

Por su parte, las formaciones analizadas pertenecientes al Jurásico Superior afloran en la comarca de la Sierra de Albarracín. Se trata de margas gris oscuro de edad kimmerdigiense depositadas en un ambiente interpretado como de *shelf*-cuenca (IGME, 1983a). Concretamente, fueron recogidas 7 muestras de diversos niveles de la *Fm. Margas de Frías* en el término municipal de Moscardón (Figura 3.40. y Figura 3.41.) y 10 en Frías de Albarracín (Figura 3.41).

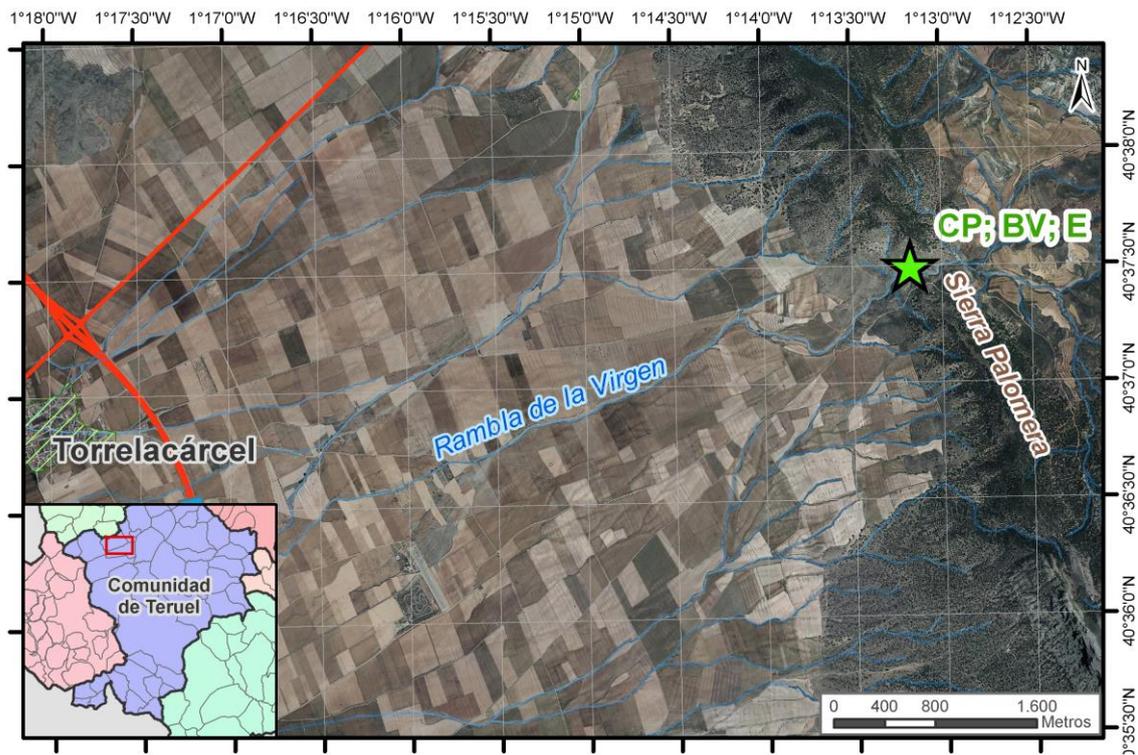


Figura 3.38. Localización del afloramiento correspondiente a la Formación Turmiel en el término municipal de Aguatón (Teruel). Elaboración propia.

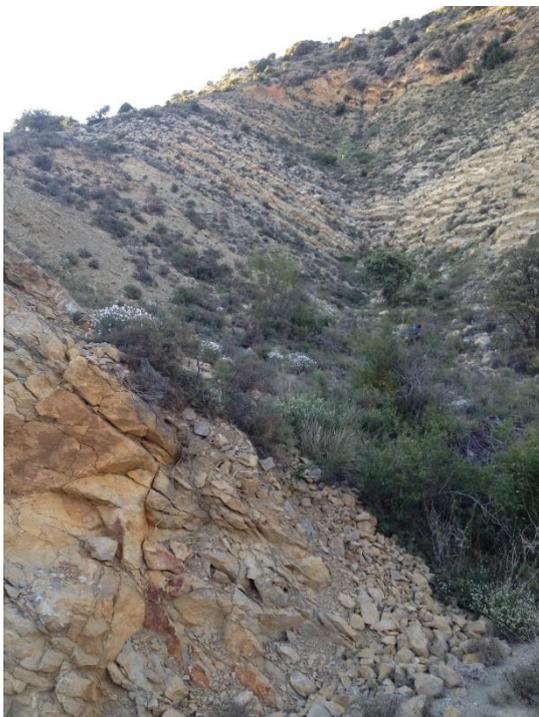


Figura 3.39. Afloramiento de la Fm. Turmiel. Fuente: Iván Polo (Aguatón, Teruel 2015).

Figura 3.40. Fm. Margas de Frías. Fuente: Iván Polo (Moscardón, Teruel 2015).

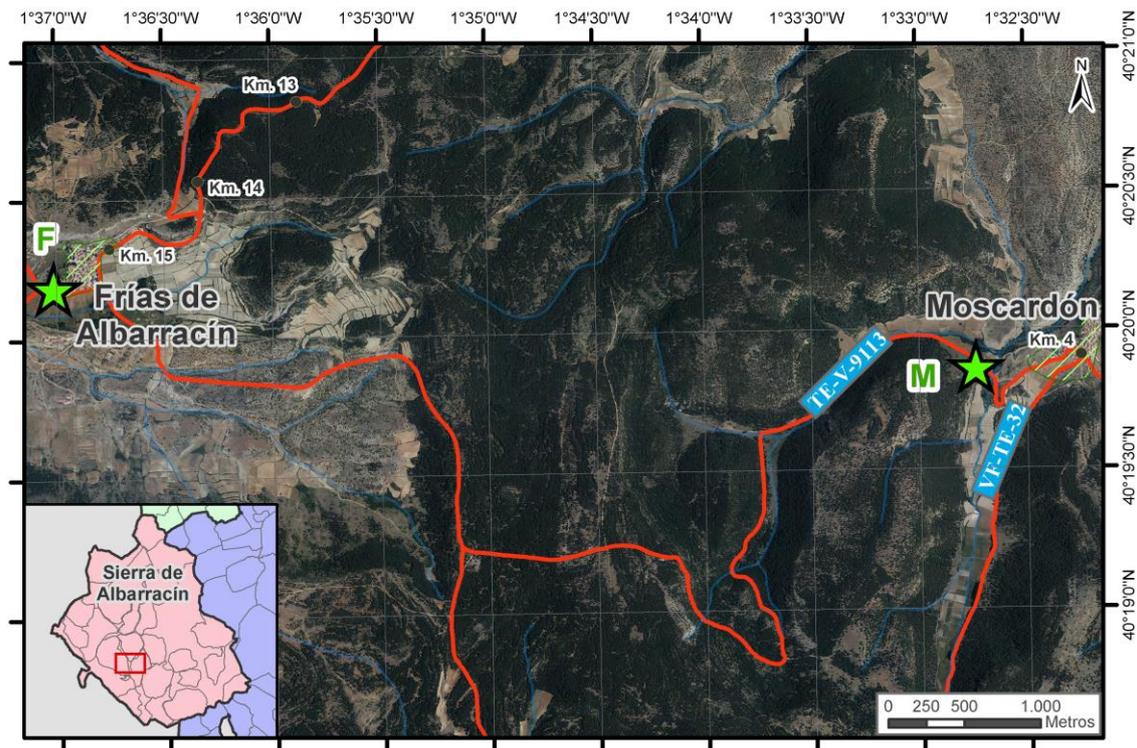


Figura 3.41. Localización de los afloramientos correspondientes a la Formación Margas de Frías en las localidades de Frías de Albarracín y Moscardón (Teruel). Elaboración propia.

En la localidad de Gea de Albarracín se muestreó la *Fm. Sot de Chera*, asimilable a la *Fm. Margas de frías*. En esta localidad se recogieron 22 ejemplares de margas (Figura 3.42. y Figura 3.43.).



Figura 3.42. Afloramiento de la Fm. Sot de Chera en la carretera que une Gea de Albarracín con Cella. Fuente: Iván Polo (Gea de Albarracín, Teruel 2015).

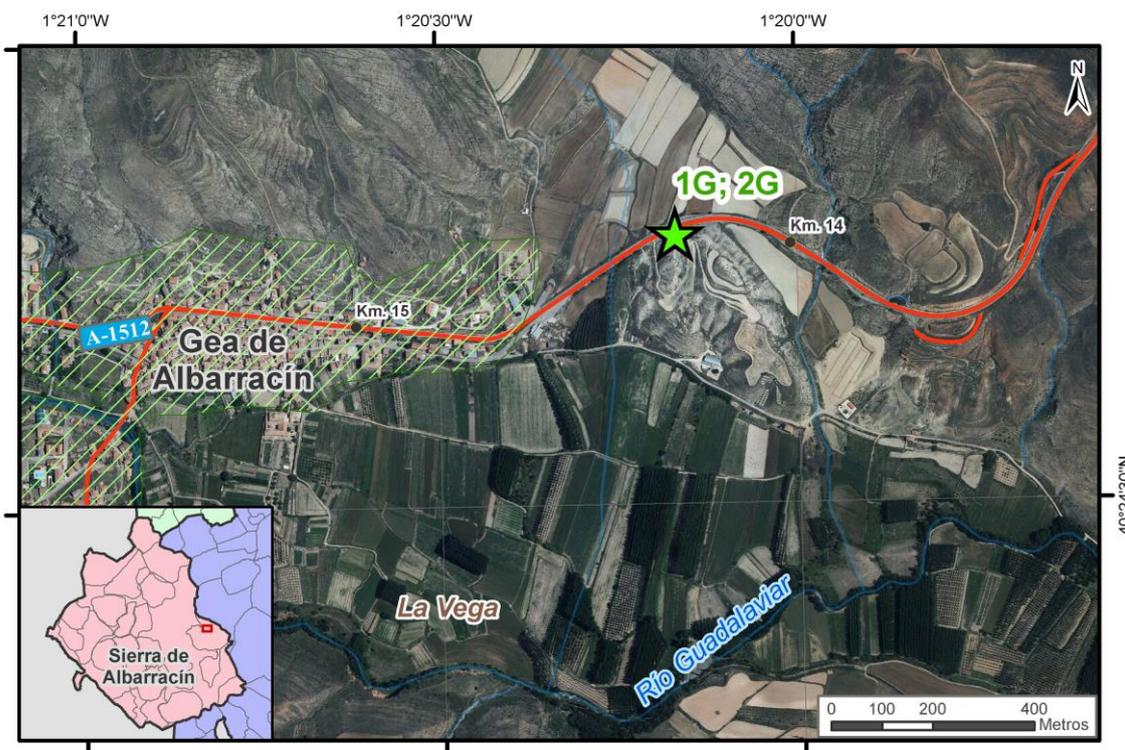


Figura 3.43. Localización del afloramiento correspondiente a la Formación Sot de Chera en el término municipal de Gea de Albarracín (Teruel). Elaboración propia.

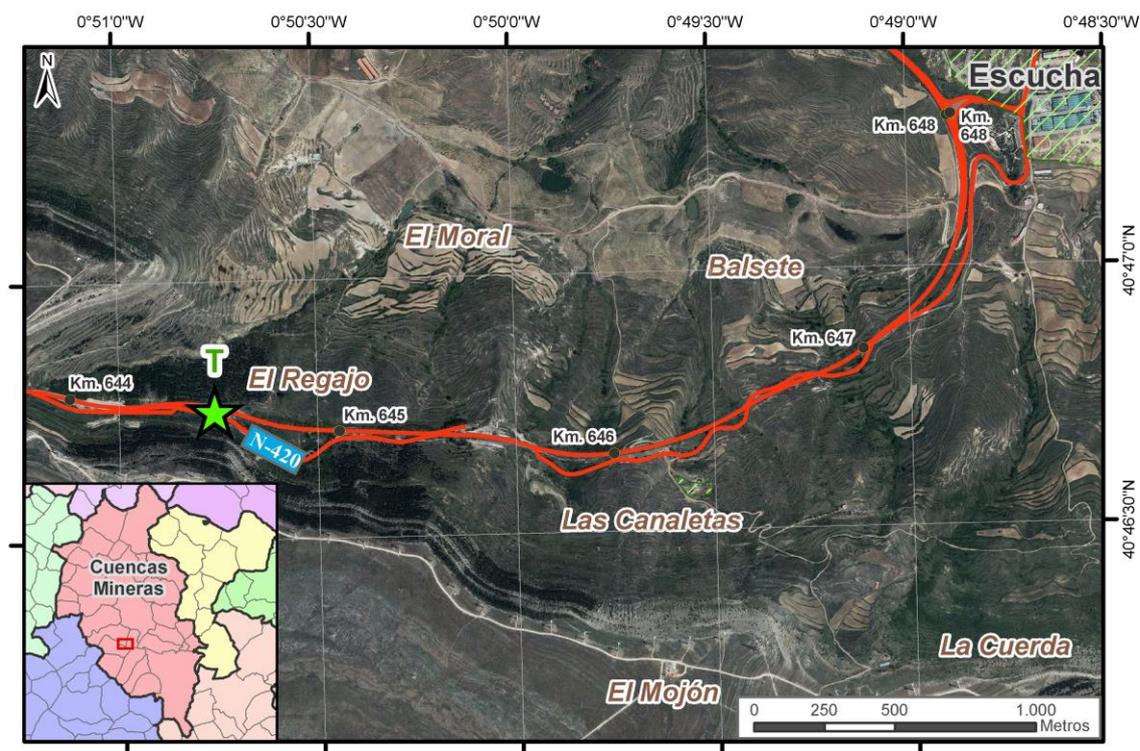


Figura 3.44. Localización del afloramiento correspondiente a la Fm. Escucha en el término municipal de Utrillas (Teruel). Elaboración propia.

Por último, el Cretácico muestreado aflora en las localidades de Utrillas y Aliaga, en la comarca de las Cuencas Mineras. Prácticamente todos los ejemplares recogidos, 18, se corresponden con niveles de la *Fm. Artoles-Forcall*, margas verdes masivas depositadas en un medio de plataforma. Esta formación fue muestreada en la localidad de Aliaga (Figura 3.45.). Cuatro muestras adicionales correspondientes a niveles carbonosos de la *Fm. Escucha* fueron tomadas en sendos afloramientos localizados en las proximidades de Aliaga y Escucha (aunque localizado este último dentro del término municipal de Utrillas, Figura 3.44.). Esta formación, dominada por los depósitos de arenas, corresponde a un sistema sedimentario costero con inclusiones de niveles de carbón desarrollado en medios de marismas y manglares asociados a sistemas de islas barrera y costeros mareales (Rodríguez-López, Meléndez, Soria, y L. de Boer, 2009).

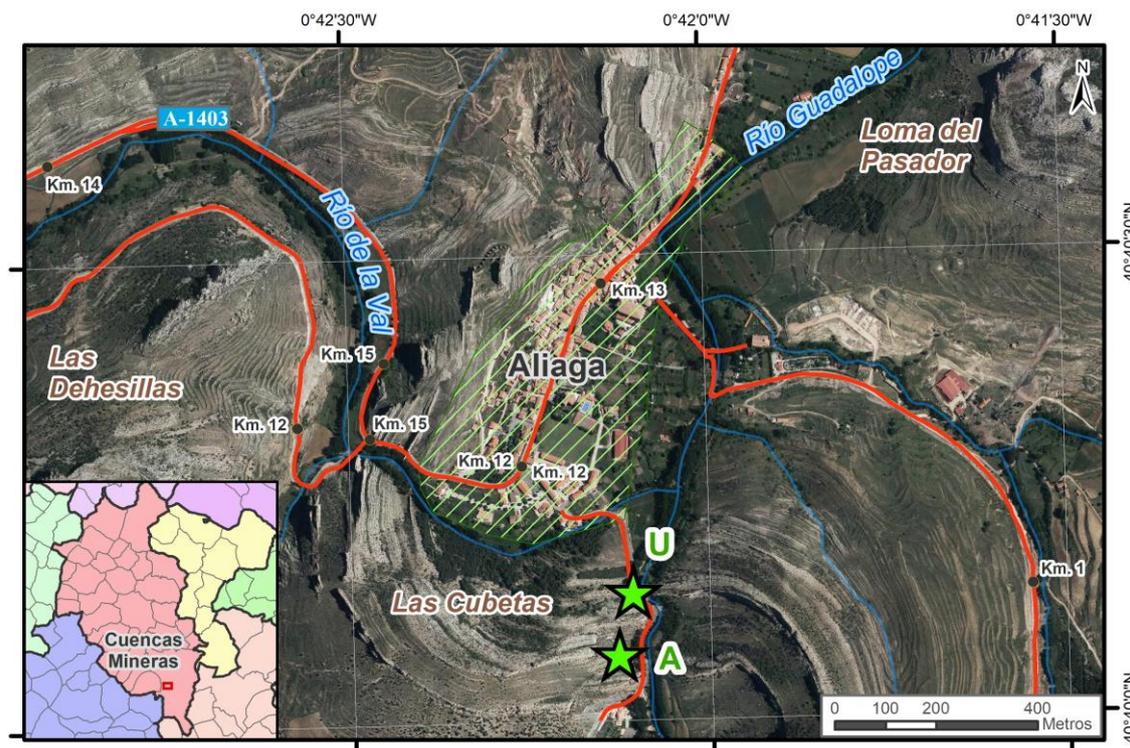


Figura 3.45. Localización de los afloramientos correspondientes a las formaciones Artoles-Forcall (A) y Escucha (U) en el término municipal de Aliaga (Teruel). Elaboración propia.

Para la determinación del potencial de las formaciones muestreadas como rocas madre generadoras de hidrocarburos se analizó su contenido en carbono orgánico mediante un análisis del *TOC (Total Organic Carbon)*, el cual determinó el contenido en materia orgánica albergado en la muestra. Este estudio requiere de aparatos específicos que no se encuentran en la Universidad de Zaragoza, por lo que fueron enviadas a un laboratorio independiente, concretamente a los Servicios de Apoyo a la Investigación (SAI) de la Universidad de La Coruña. Por este motivo, el número de muestras enviadas tuvo que ser economizado. De este modo, se ejecutó un análisis calcimétrico previo, con el objetivo de seleccionar aquellas que mostraran unas características más interesantes.

Este análisis fue realizado en los laboratorios del Departamento de Estratigrafía y Sedimentología de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Zaragoza. Las 118 muestras recogidas en el campo fueron sometidas a un proceso de molienda y tamizado hasta conseguir pulverizar la muestra hasta un tamaño de grano apto para la correcta realización de la calcimetría. Los resultados de este análisis representan el porcentaje de  $\text{CaCO}_3$  de la muestra (Tabla 3.2.). En principio, aquellas muestras con un porcentaje de carbonato de

calcio menor dentro de cada formación serán las seleccionadas para ser sometidas al análisis TOC. De esta forma, fueron escogidas para ser analizadas 22 muestras, procedentes de 10 afloramientos diferentes, cuyos resultados serán mostrados en el sexto apartado de la tesis. Estas 22 muestras fueron incorporadas a la base de datos generada, en forma de indicios, dentro del grupo correspondiente a los recursos energéticos.

*Tabla 3.2. Resultados del análisis calcimétrico efectuado a las muestras tomadas en el campo. En azul se resaltan las muestras seleccionadas para el análisis TOC. Elaboración propia.*

Muestra	%CaCO <sub>3</sub>						
CH1	0	OT4	45,4	F4	5,6	1G16	43,8
CH2	0	OT5	28,4	F5	2,6	1G17	32
CH3	0	OT6	45,4	F6	7,2	1G18	46,4
CH4	0	OT7	49,5	F7	9,2	2G1	30,3
CH5	0	OT8	35,1	F8	35,9	2G2	25,6
CH6	0	OT9	32	F9	24,6	2G3	20
CH7	0	OT10	37,1	F10	5,2	2G4	37,9
CH8	0	OT11	36,1	M1	40	T1	32,4
2TO1	0	CP1	61,6	M2	44,1	T2	53
2TO2	0	CP2	80,5	M3	37,4	T3	69,2
2TO3	0	BV1	75,5	M4	47,2	U1	0
2TO4	0	BV2	43,9	M5	45,1	A1	51,5
2TO5	0	BV3	61,2	M6	20,5	A2	28,7
2TO6	0	BV4	48,5	M7	32,7	A3	67,7
TO1	0	BV5	61,2	1G1	17,9	A4	16,4
TO2	0	BV6	68,9	1G2	25,6	A5	2,1
TO3	0	BV7	80,6	1G3	24,6	A6	34,9
TO4	0	BV8	65,3	1G4	43,1	A7	6,2
C1	0	BV9	57,1	1G5	46,2	A8	10,3
C2	0	BV10	35,7	1G6	41,2	A9	7,2
C3	0	BV11	79,6	1G7	51,5	A10	23,1
C4	2	BV12	82,1	1G8	56,7	A11	25,6
C5	0	BV13	54,1	1G9	51,5	A12	46,2
C6	0	BV14	56,6	1G10	47,9	A13	26,2
O1	68	BV15	51,3	1G11	39,7	A14	17,5
O2	38	E1	41,1	1G12	38,7	A15	14,4
O3	71	E2	40,5	1G13	36,1	A16	4,1
OT1	59,8	F1	9,2	1G14	46,4	A17	0
OT2	23,2	F2	7,7	1G15	32,5	A18	26,8
OT3	57,2	F3	7,7				

Como se analizó en el segundo apartado del Capítulo II de esta tesis, referente a la formación de las rocas generadoras de hidrocarburos, el contenido en materia orgánica en las rocas es un factor crucial para que el gas y el petróleo puedan generarse. Un modo de cuantificar este valor es mediante la medida del contenido en carbono orgánico de la roca, a través del análisis del TOC (*Total Organic Carbon*).

Los valores del TOC pueden ser obtenidos mediante técnicas de combustión directa, tras la pulverización de la muestra y el tratamiento con ácido para eliminar impurezas y contaminantes. Estas muestras serán combustionadas a una temperatura de 1.200°C, temperatura en la que el carbono contenido en el kerógeno se convierte en CO y CO<sub>2</sub>. El carbono liberado es medido y convertido en un valor, que se corresponde con el porcentaje en peso que el carbono orgánico supone en la roca (Boyer et al., 2011). Un valor de TOC de 1% indica que de cada 100 gramos de roca, uno es de carbono orgánico.

### 3.3.6. Elementos críticos en la C.A. de Aragón

Como se vio en el segundo capítulo de la tesis, la Unión Europea señala como elementos críticos a las materias primas que sobrepasan unos umbrales establecidos en relación con la importancia económica del elemento y de sus aplicaciones industriales y con el riesgo de suministro desde los países productores hacia Europa. Algunos de los minerales y elementos recogidos en esta lista se encuentran presentes en la Comunidad Autónoma de Aragón, bien sea como indicios minerales, explotaciones abandonadas, o, incluso, derechos recogidos en el Catastro Minero. Sin embargo, en la actualidad no existe ninguna labor activa que explote alguna de estas materias primas críticas. Por otro lado, todos los elementos calificados como críticos dentro del territorio aragonés pertenecen a dos categorías concretas de recursos: los minerales metálicos (antimonio, barita, cobalto, fósforo y magnesio) y los minerales industriales (espato flúor, grafito y sílice).

El elemento más nombrado entre las fuentes de las que procede la información (Figura 3.46), con mucha diferencia sobre el resto, es el bario. El espato flúor supera los 30 elementos inventariados y los 10 el antimonio y el magnesio. Entre los elementos menos mencionados en las fuentes consultadas se encuentran la sílice, los fosfatos, el grafito y el cobalto.

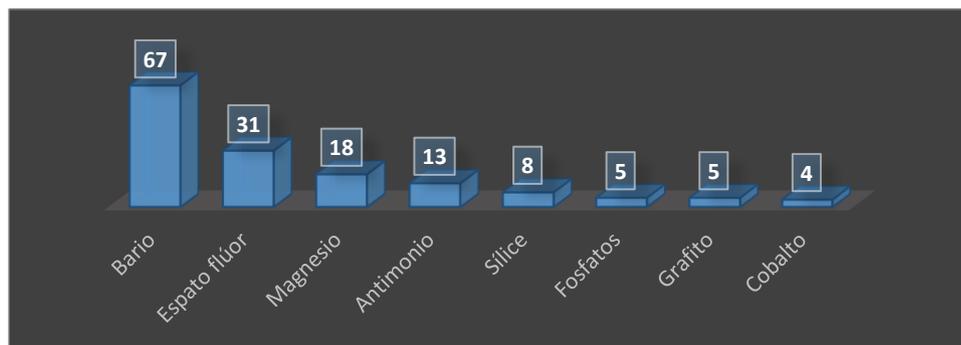


Figura 3.46. Número de registros inventariados referentes a elementos críticos. Elaboración propia.

Varias son las fuentes que apuntan a la existencia de antimonio dentro de los límites de la región aragonesa. Se trata, en la mayoría de los casos, de indicios (11 de los 13 puntos inventariados referentes al antimonio están catalogados dentro de esta categoría), procedentes, fundamentalmente, del servicio WMS de la Base de Datos de Metalogenia (Figura 3.47.). Calvo (2006) en el libro titulado *Minerales de Aragón* señala la existencia de antiguas explotaciones de estibina dentro del término municipal de Aguarón, en la provincia de Zaragoza. Asimismo, en la memoria de la hoja del Mapa Geológico de la Serie MAGNA número 466 (Moyuela), se indica la existencia de una antigua explotación de antimonio (IGME, 1989b) en el término de Lanzuela (Teruel).



Figura 3.47. Número de elementos inventariados referentes al antimonio por provincia, agrupados por estado de actividad. Elaboración propia.

En la comunidad aragonesa, la barita es relativamente más frecuente que el antimonio. Dentro de la geobase de datos generada para esta tesis se incorporaron 67 elementos relativos a indicios y antiguas explotaciones ya abandonadas de barita en el territorio (Figura 3.48). La mayoría de los puntos incorporados proceden de los servicios WMS correspondientes a la Base de Datos de Indicios o explotaciones de Rocas y Minerales Industriales y a la Base de Datos de Metalogenia.

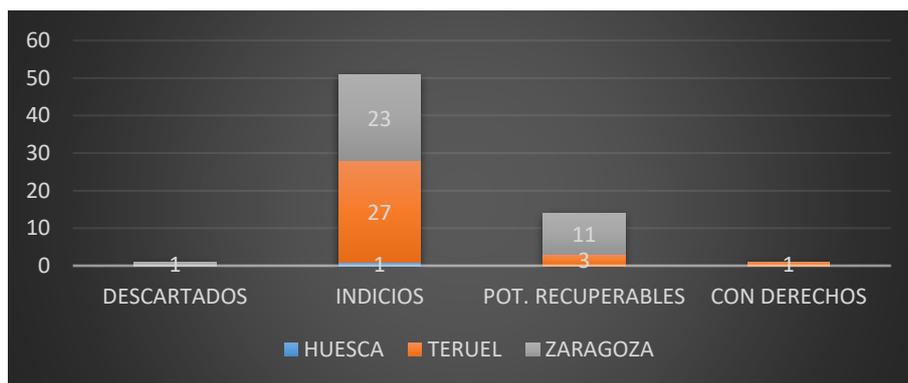


Figura 3.48. Número de elementos inventariados referentes a la barita por provincia, agrupados por estado de actividad. Elaboración propia.

El cobalto, por su parte, es un elemento relativamente escaso en la comunidad, ya que solo han sido inventariados dos indicios y dos explotaciones abandonadas (Figura 3.49.).



Figura 3.49. Número de elementos inventariados referentes al cobalto por provincia, agrupados por estado de actividad. Elaboración propia.

Durante la generación de la base de datos sobre los recursos mineros de Aragón, fueron identificados 31 puntos relativos a la presencia de espato flúor dentro de los límites de la comunidad. Como ocurría en los casos anteriores, la mayor parte de los elementos incorporados al inventario se corresponden con indicios (Figura 3.50) que proceden del servicio WMS Base de Datos de Metalogenia.

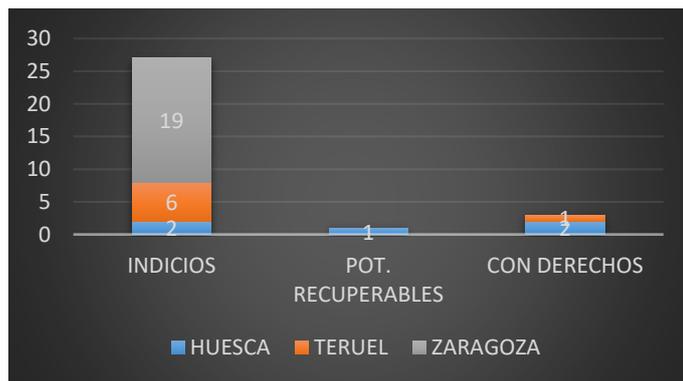


Figura 3.50. Número de elementos inventariados referentes al espato flúor por provincia, agrupados por estado de actividad. Elaboración propia.

Atendiendo al número de puntos referentes al fósforo incorporados en el inventario puede deducirse que las mineralizaciones de fosfatos no son muy frecuentes en la región aragonesa (Figura 3.51.). Dos de los puntos inventariados, ambos dentro de la provincia de Zaragoza, se corresponden con indicios. Por otro lado, existen tres antiguas labores ya abandonadas en el territorio aragonés, dos de ellas situadas en la provincia de Zaragoza y una en la de Teruel.



Figura 3.51. Número de elementos inventariados referentes al fósforo por provincia, agrupados por estado de actividad. Elaboración propia.

Las fuentes consultadas solo arrojan cinco resultados correspondientes a indicios de grafito natural en el territorio aragonés (Figura 3.52.), si bien es probable que este mineral pueda encontrarse como asociado en las cuencas ligníferas de la comunidad.

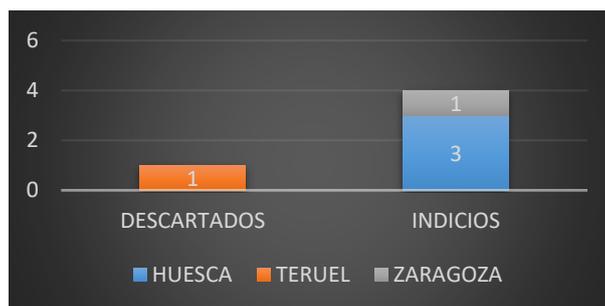


Figura 3.52. Número de elementos inventariados referentes al grafito por provincia, agrupados por estado de actividad. Elaboración propia.

Dentro de la bibliografía consultada se aprecian numerosas referencias a la presencia de magnesio repartidas por toda la comunidad (Figura 3.53.). Algunas de ellas, sobre todo las localizadas en el área central de la comunidad aparecen formando sales de magnesio, asociadas a otros tipos de sales.

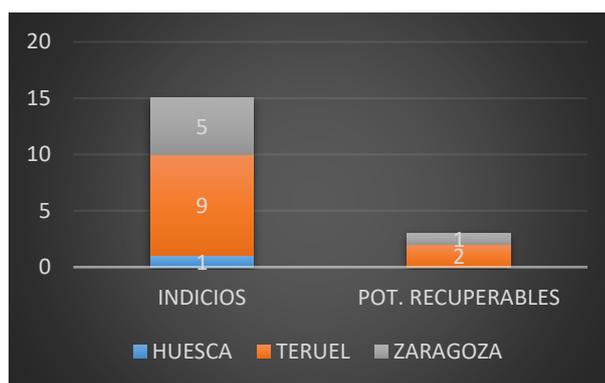


Figura 3.53. Número de elementos inventariados referentes al magnesio por provincia, agrupados por estado de actividad. Elaboración propia.

En lo que respecta a la sílice, la Comunidad Autónoma de Aragón cuenta con diversos derechos mineros recogidos en el Catastro, algunos de ellos todavía vigentes y otros que han sido descartados (Figura 3.54.). Todos estos registros se localizan dentro de la provincia de Teruel.



Figura 3.54. Número de elementos inventariados referentes a la sílice por provincia, agrupados por estado de actividad. Elaboración propia.

La distribución de estos elementos en la región aragonesa puede ser observada, de forma genérica, en el mapa representado en la Figura 3.55. Por provincias, Zaragoza, con un 47%, es la que cuenta con un mayor número de puntos registrados relacionados con elementos críticos. Le sigue de cerca, Teruel, con un 42%. Huesca es la provincia en la que menor número de este tipo de elementos ha sido catalogado (11%).

Todos los puntos inventariados referidos al antimonio se localizan en la Cordillera Ibérica, 8 en los límites de la provincia de Zaragoza y 5 en la de Teruel. Seis de ellos pertenecen al dominio aragonés del Sistema Ibérico, que se extiende al norte de la fosa de Teruel-Calatayud, mientras que siete lo harán en la rama castellana. Prácticamente todos los puntos inventariados correspondientes a indicios y antiguas explotaciones de antimonio se localizan en un área muy concreta del territorio aragonés, comprendido entre las Cuencas Mineras turolenses y la ciudad de Calatayud, en Zaragoza. Solo un único indicio puede ser encontrado fuera de esta área: el situado en la Sierra de Albarracín, en el término municipal de Torres de Albarracín.

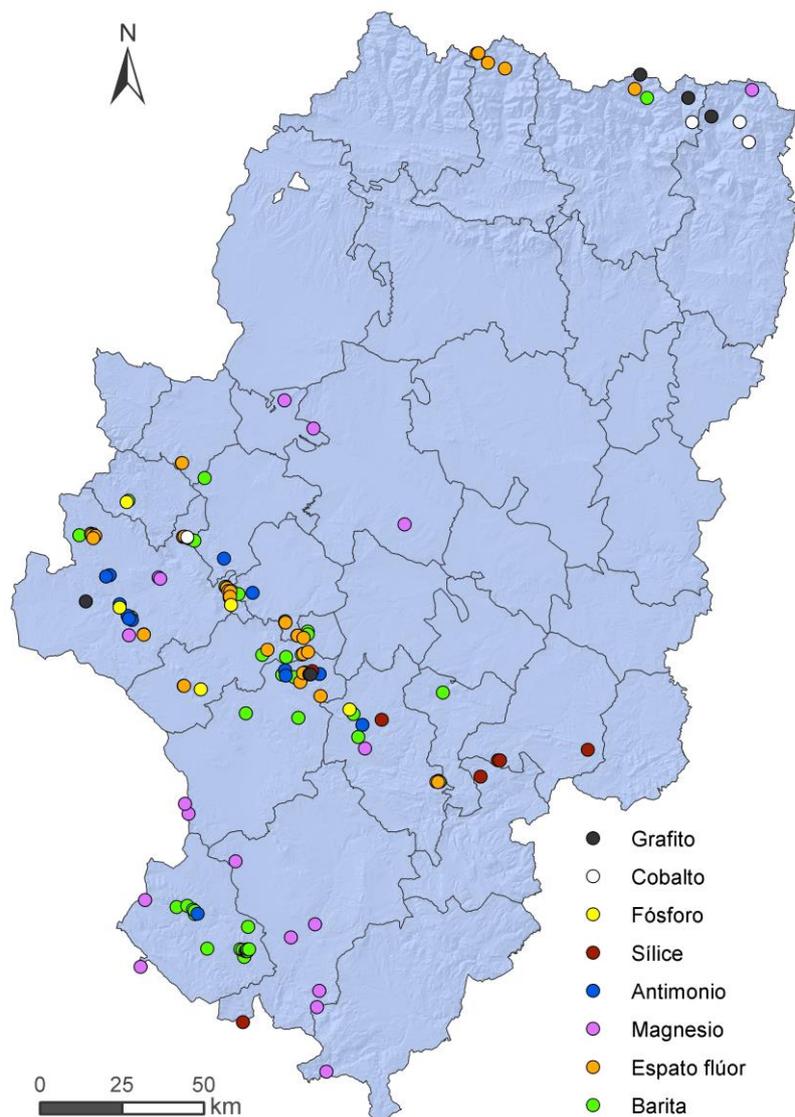


Figura 3.55. Distribución espacial de los elementos críticos de la región aragonesa. Elaboración propia.

La distribución de los indicios de barita y de las explotaciones abandonadas de este mineral recuerda, en un cierto modo, a la disposición en el territorio de los puntos correspondientes al antimonio. La mayoría de la barita aparece en el Sistema Ibérico, tanto en Teruel como en Zaragoza, desde la Sierra del Moncayo hasta las Cuencas Mineras. Un número importante de indicios de barita han sido mencionados en la comarca turolense de la Sierra de Albarracín. Finalmente, el libro de Minerales de Aragón (Calvo, 2006), indica la presencia de abundante barita en el filón central de las minas de galena de Parzán, en el término municipal de Bielsa. En el año 2017, la empresa Hispano Minera de Rocas solicitó un

permiso de investigación para barita, fluorita y arenas, que recibe el nombre de Salomón y que se localiza en los términos municipales de La Zoma y Cañizar del Olivar, en la provincia de Teruel.

Por otra parte, uno de los indicios correspondientes al cobalto, y el único localizado en la Cordillera Ibérica, se ubica entre las localidades de Chodes y Morés. El resto de puntos inventariados se sitúan en el área más oriental de los Pirineos, próximos a la frontera con Cataluña. La memoria asociada al mapa de la serie MAGNA 179 (Bielsa) informa de una explotación abandonada de cobalto en la mina de Gistaín, mientras que la hoja 180 (Benasque) se indica la presencia de una labor abandonada en esta localidad y de un indicio de cobalto en el término de Castejón de Sos (IGME, 2002).

En el caso del espato flúor, puede destacarse la presencia en el Catastro Minero de dos Derechos Mineros, denominados Remedios y Las Águilas, situados en el área pirenaica, y otro permiso de investigación en Teruel. Además, en la hoja 145 (Sallent) del Mapa Geológico, se informa de la existencia de una mineralización hidrotermal de fluorita en explotación en el momento de la elaboración de la memoria asociada al mapa, localizada próxima a la carretera con Francia (IGME, 1989a). En la actualidad, esta antigua mina, ya desmantelada, queda englobada dentro de la extensión de la pista de esquí de Formigal. La distribución del resto de puntos inventariados en el territorio es asimilable a las ya descritas para elementos como el antimonio o la barita, en la que se observaba una concentración de estos puntos en el Sistema Ibérico, entre la comarca de las Cuencas Mineras y la Sierra del Moncayo. Existe también una serie de puntos referentes al espato flúor en el área central de los pirineos aragoneses.

En lo que respecta al fósforo, cinco han sido el total de puntos correspondientes a indicios y explotaciones abandonadas registrados dentro de los límites de la comunidad, todos ellos en la Cordillera Ibérica, entre las Sierras del Moncayo y la frontera con la provincia de Teruel.

La mayoría de los indicios de grafito localizados dentro de los límites de la región se localizan en el área centro-oriental de los Pirineos, mientras que dos de los puntos inventariados se encuentran en la Cordillera Ibérica. Estos dos últimos puntos se corresponden con un indicio y con un derecho minero descartado.

En lo que respecta al magnesio, la hoja 567 (Teruel) de la serie MAGNA (IGME, 1983b) destaca la presencia restos de labores abandonadas de óxido de magnesio en formaciones miocenas al norte del pueblo de San Blas y en las cercanías de Tortajada, mientras que la hoja 590 (La Puebla de Valverde) señala la presencia de indicios de óxidos de magnesio en materiales jurásicos de la zona (IGME, 1983c). Todos los elementos inventariados referidos al magnesio se corresponden con indicios o explotaciones abandonadas. La mayoría de estos puntos están localizados al sur de la comunidad, en la Sierra de Albarracín, en la Sierra de Javalambre y en el entorno de la ciudad de Teruel. También existe un indicio en la comarca de las Cuencas Mineras. Fuera de esta provincia, han sido inventariados otros elementos en la facción de la Cordillera Ibérica ubicada en el entorno de la ciudad de Calatayud, en la depresión del Ebro y en la frontera entre Aragón, Francia y Cataluña, en los Pirineos oscenses.

Finalmente, casi todos los registros correspondientes a la sílice se localizan en el piedemonte de la Cordillera Ibérica, excepto uno, ubicado al sur de la Comunidad de Teruel, todos ellos dentro de la provincia de Teruel. Los derechos concedidos en la actualidad se ubican en el margen oriental de la comunidad, concretamente, en las comarcas del Bajo Aragón y del Maestrazgo.

### 3.4. ÁMBITO DE ESTUDIO: CARACTERÍSTICAS AMBIENTALES Y SOCIOECONÓMICAS DEL TERRITORIO

En este gran apartado se presenta una selección de las características físicas y socioeconómicas de la región aragonesa que constituyen el contexto geográfico y espacial de los recursos minerales, energéticos y aguas objeto de estudio. De este modo serán expuestos de modo sistemático los elementos de interés específico para las dos dimensiones analíticas propuestas relacionadas con las características del territorio y sobre lo que él se asienta. Son las denominadas *aptitud del terreno e inserción socioeconómica*.

De este modo, en este apartado se presentarán y caracterizarán los elementos ambientales y socioeconómicos del territorio que son de interés para la evaluación del potencial de los recursos y que por eso, en su mayor parte, han sido tomados como variables para la definición de los indicadores con los que evaluar el potencial interés minero de los

yacimientos e indicios incluidos en el inventario, tal y como se verá en el apartado IV. En este sentido, veremos también cómo se relacionan estos factores con los indicadores propuestos en el análisis de la potencialidad minera de los recursos aragoneses, derivados de la revisión bibliográfica plasmada en el Capítulo II de la tesis.

En los siguientes apartados, estos elementos serán presentados de manera sistemática en dos bloques diferentes, incorporando las características que sean relevantes para respaldar el análisis de dos de las dimensiones consideradas.

#### 3.4.1. Características ambientales del territorio para el estudio de la dimensión *Aptitud del terreno*

En este primer apartado veremos los aspectos relevantes para el estudio de la dimensión denominada *Aptitud del terreno*, entre los que se incluyen la estructura del relieve y otros factores derivados (pendiente, litología, cobertura edáfica, permeabilidad y factores climáticos), el drenaje ácido de minas, las características hidrográficas e hidrológicas del territorio, así como los cauces y masas de agua artificiales y, finalmente, los riesgos geológicos y climáticos más problemáticos de la región. También se incluirá diversa cartografía en la que se incorporan topónimos y otros elementos geográficos que pueden no haber sido tomados en cuenta de forma directa en la realización de los análisis, pero que han sido empleados en las descripciones de las variables o de los resultados, como mapas con topónimos de elementos geográficos relativos a ríos, sierras, etc.

##### 3.4.1.1. Estructura del relieve e implicaciones en la adecuación topográfica (litología y pendientes)

La descripción de las variables correspondientes a la dimensión *Aptitud del terreno* comienza con una referencia general a las unidades del relieve que estructuran el territorio aragonés. Quedan así justificadas otras características o elementos propios de la superficie del territorio, como son la litología predominante o las pendientes que presenta el terreno. Además, será introducida una variable importante en varios de los indicadores propuestos en el análisis y que dependerá, en cierta medida, de las características asociadas a la cobertura rocosa o edáfica: la permeabilidad.

Dentro de relieve aragonés pueden distinguirse tres unidades principales (Figura 3.56.). Dos de ellas se corresponden con importantes sistemas montañosos: los Pirineos al norte y la Cordillera Ibérica en el sur. En el centro de la comunidad, donde se localiza además la capital de la región, se extiende una gran llanura, la depresión del Ebro, atravesada por el río homónimo.

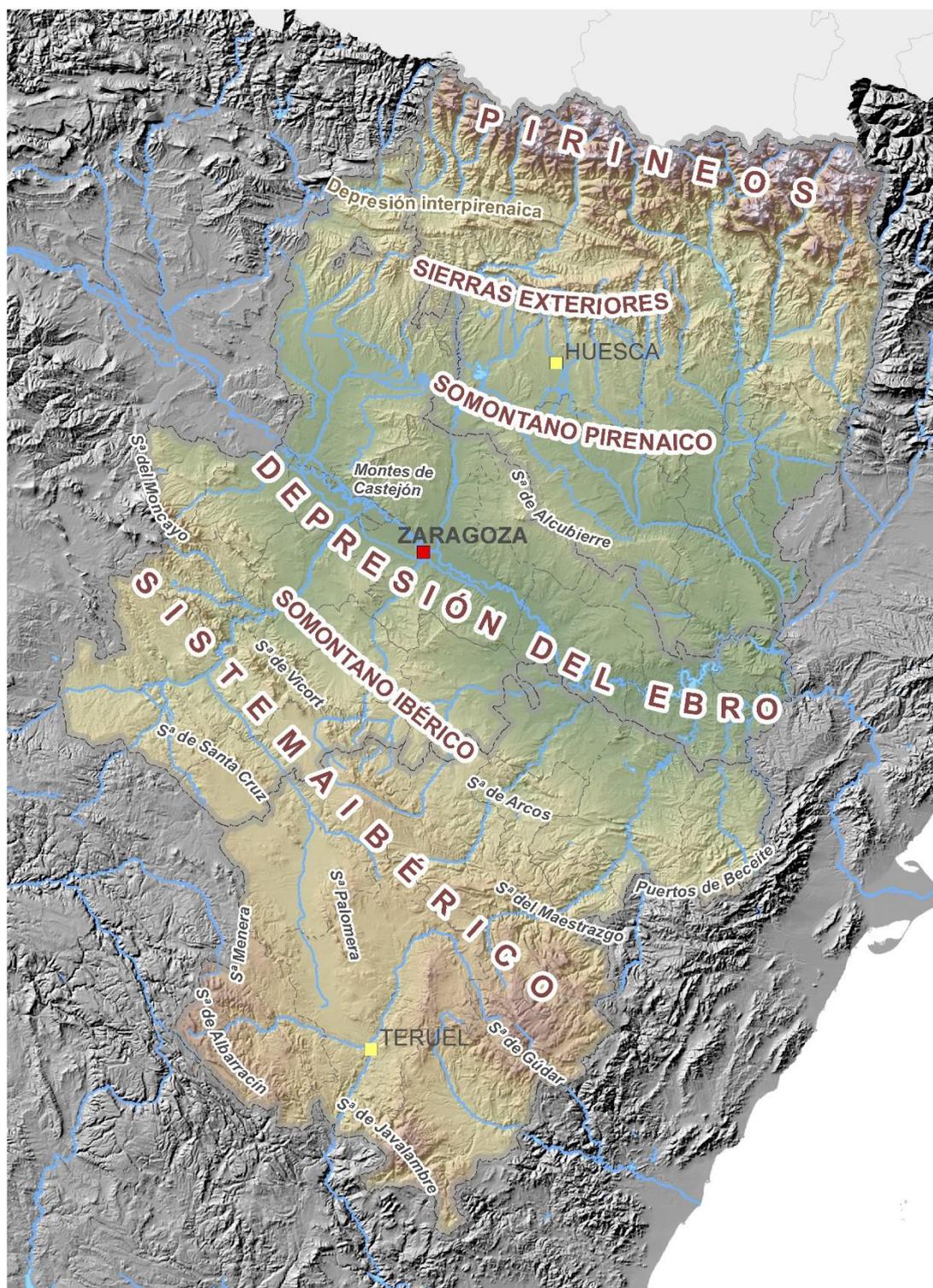


Figura 3.56. Principales unidades del relieve aragonés. Elaboración: Propia.

Los Pirineos son una cordillera montañosa formada durante la Orogenia Alpina, que se extiende por más de 430 km desde el mar Mediterráneo hasta el Cantábrico. Con una orientación predominante E-O, constituye una barrera geográfica y una frontera natural

entre Francia y España. El sector aragonés, localizado en el centro de la cordillera es el que presenta las mayores elevaciones, perdiendo altura progresivamente hacia las áreas marginales (Peña y Lozano, 2004). En este sistema montañoso se distinguen, a su vez, cuatro subunidades dentro de la región aragonesa que, de norte a sur, se corresponden con: el Pirineo Axial, las Sierras Interiores, la Depresión Intrapirenaica y las Sierras Exteriores o Prepireneo.

En el área central de la comunidad se extiende la depresión del Ebro, una amplia fosa tectónica, limitada por los Pirineos, el Sistema Ibérico y las Cordilleras Costero-Catalanas. Se caracteriza por presentar un relieve marcado por la presencia de extensas llanuras situadas a una baja altitud. El hecho de que esta cuenca fuera un sistema endorreico que recibía numerosos aportes sedimentarios, condicionó el tipo de materiales depositados a lo largo de su histórica geológica: caracterizada por el dominio de conglomerados y areniscas en las facies proximales; areniscas, arcillas e intercalaciones carbonatadas en la intermedias y, en las facies más distales, yesos y sales cloruradas (Peña y Lozano, 2004).

Entre la Depresión del Ebro y las zonas montañosas localizadas al norte y al sur de la región, se localizan los somontanos. Estas subunidades coinciden con la zona de paso desde el valle del Ebro a las sierras prepirenaicas o a la Cordillera Ibérica.

La Cordillera Ibérica, por su parte, es un sistema montañoso que presenta una orientación principal NW-SE. Se extiende a lo largo de más de 500 km, ejerciendo como barrera entre la Meseta Central y la Depresión del Ebro. Su anchura en algunos puntos sobrepasa los 100 km. La presencia de amplias depresiones intramontañosas de origen tectónico condiciona la individualización de ramales montañosos que, en ocasiones, superan los 2.000 m de altitud. Dentro del territorio aragonés pueden distinguirse las dos grandes ramas en las que se divide la Cordillera Ibérica. Esta división, para la que la fosa de Calatayud-Teruel se establece como unidad geológica de referencia, separa la rama aragonesa, que se extiende al norte de esta depresión, y la rama castellana, al sur de la misma.

La estructura del relieve tiene una influencia determinante en tres variables relevantes en relación con el tema tratado en esta tesis: la pendiente del terreno, la litología y la cobertura edáfica, que serán tratadas a continuación.

Exceptuando algunos tipos de agricultura o de actividades relacionadas con el ocio, como el esquí, que requieren de una cierta pendiente para poder ser llevadas a cabo, el desarrollo de gran parte de las actividades económicas se verá favorecido por la existencia de terrenos relativamente planos que no necesiten de grandes modificaciones en su topografía para la puesta en marcha de la actividad económica. La minería no es una excepción, y no solo porque la estabilidad física del frente minero y de los terrenos afectados por las labores extractivas será mayor en superficies con menores pendientes, sino también porque requiere de unos edificios auxiliares que permitan el desarrollo de las diferentes fases de la actividad minera y que deberán ser cimentados preferentemente en terrenos llanos. Por otro lado, la estabilidad y disponibilidad de espacio para la construcción de las balsas y escombreras almacenadoras de desechos de la actividad extractiva también se verá condicionada por la existencia de terrenos de pendientes limitadas.

Desde el punto de vista ambiental la pendiente también juega un papel importante. En áreas de relieves escarpados el gradiente altitudinal favorecerá la dispersión de los efluentes líquidos. También de la escorrentía de las aguas procedentes de la zona afectada por la actividad minera, cargada, posiblemente, con minerales y otros productos contaminantes verá incrementada su dispersión en el medio. Finalmente, y aunque se verá más adelante en el apartado correspondiente a los riesgos naturales, los procesos de remoción en masa y de desprendimientos de laderas se verán favorecidos por pendientes escarpadas.

En relación con la adecuación del terreno para albergar los edificios auxiliares necesarios para el desarrollo de la actividad minera, así como de otras estructuras derivadas de la misma, tales como balsas y escombreras, es importante tomar también en cuenta la diferencia de cotas que presenta este terreno sobre el que se emplazaría la potencial actividad minera. En concreto, y tal y como se verá en el indicador correspondiente, se ha considerado el intervalo existente entre la altura media sobre el nivel del mar de dicho terreno y la altura máxima o mínima registrada.

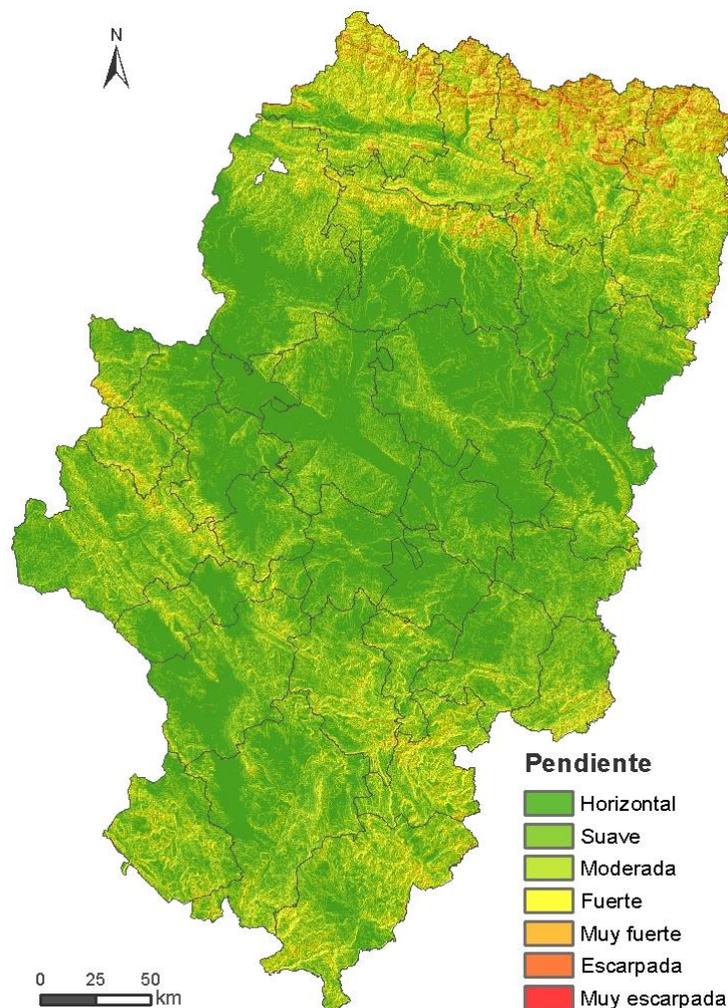


Figura 3.57. Mapa de pendientes de Aragón. Elaboración: propia.

La pendiente de un terreno puede ser medida en valores de tanto por ciento o en grados, siendo ambas escalas equivalentes. Ingenieros y científicos utilizan diversas gradaciones para definir las pendientes. Así, por ejemplo van Zuidam (1986) clasifica las pendientes en baja (menor a  $8^\circ$ ), moderada (entre 8 y  $16^\circ$ ), fuerte (entre 16 y  $35^\circ$ ) y muy fuerte (mayores a  $35^\circ$ ). Otro Rango de Pendientes basados en los trabajos de Araya y Börgel (1972), Young (1975) y Ferrando (1993) habla de tipos de pendiente horizontal ( $0-2^\circ$ ), suave ( $2-5$ ), moderada ( $5-10$ ), fuerte ( $10-20$ ), muy fuerte a moderadamente escarpada ( $20-30$ ), escarpada ( $30-45$ ) y muy escarpada o acantilada cuando es mayor de 45 grados (AES Gener, s. f.).

Utilizando esta última escala para representar el mapa de pendientes de Aragón, que fue elaborado a partir de los Modelos de Elevación del Terreno ofrecidos por el Instituto Geográfico Nacional, pueden observarse perfectamente los contrastes que presenta la Comunidad (Figura 3.57.). A primera vista, destacan las áreas horizontales o casi horizontales correspondientes a la llanura de inundación del río Ebro, especialmente aguas arriba de la ciudad de Zaragoza y en el propio entorno de la misma. A grandes rasgos, toda la depresión del Ebro, entre las Sierras Exteriores oscenses y la rama más septentrional de la Cordillera Ibérica, presenta relieves muy moderados. Tampoco la fosa del Jiloca, el entorno de la ciudad de Teruel o el paso de la Autovía Mudéjar entre esta provincia y la de Castellón, muestra relieves importantes.

En contraste con estas zonas de pendientes suaves emergen las zonas montañosas de la comunidad, si bien, existen fuertes diferencias entre ellas. Por un lado, las pendientes en el Sistema Ibérico raramente sobrepasan la catalogación de fuertes, exceptuando algunos puntos pertenecientes a categorías superiores localizados en el área del Moncayo y de los puertos de Beceite. En la zona Pirenaica y de las Sierras Exteriores predominan las áreas catalogadas como escarpadas o moderadamente escarpadas, especialmente en el eje de la cordillera.

Por otra parte, como podrá ser comprobado en el Capítulo IV de la tesis, relativo a la metodología empleada para el análisis de los recursos minerales, energéticos y las aguas de Aragón, la litología es una característica considerada de forma directa en el indicador relativo a la *Generación y difusión del drenaje ácido de minas y otros tipos de contaminantes*. La litología predominante determinará la naturaleza de la roca encajante, información especialmente relevante en el caso de la minería de los minerales metálicos y los recursos energéticos, en relación con la capacidad reactiva del medio para neutralizar las perturbaciones derivadas del drenaje ácido de minas. Indirectamente, la litología predominante estará relacionada con la distribución de los yacimientos minerales presentes en el territorio, como pudo verse en la segunda parte de este capítulo. En el caso de las rocas industriales y ornamentales, la litología determinará la ubicación del propio recurso explotable.

Según el *mapa de litologías de Aragón* (Instituto Aragonés del Medio Ambiente, 1993) existen en la región 57 categorías litológicas diferentes, en función del tipo de roca dominante y las posibles intercalaciones de otras litologías asociadas a la principal. Estas categorías aparecen reclasificadas, a su vez, en seis grupos principales, siguiendo criterios genéticos y litológicos: *rocas detríticas*, divididas según el tamaño de grano dominante (grueso, medio o fino), *rocas carbonatadas* (distinguiendo entre calizas, margas o dolomías dominantes), *rocas evaporíticas*, *rocas volcánicas*, *rocas plutónicas* y *depósitos recientes* de edad cuaternaria. Su distribución espacial se representa en el mapa de la Figura 3.58.

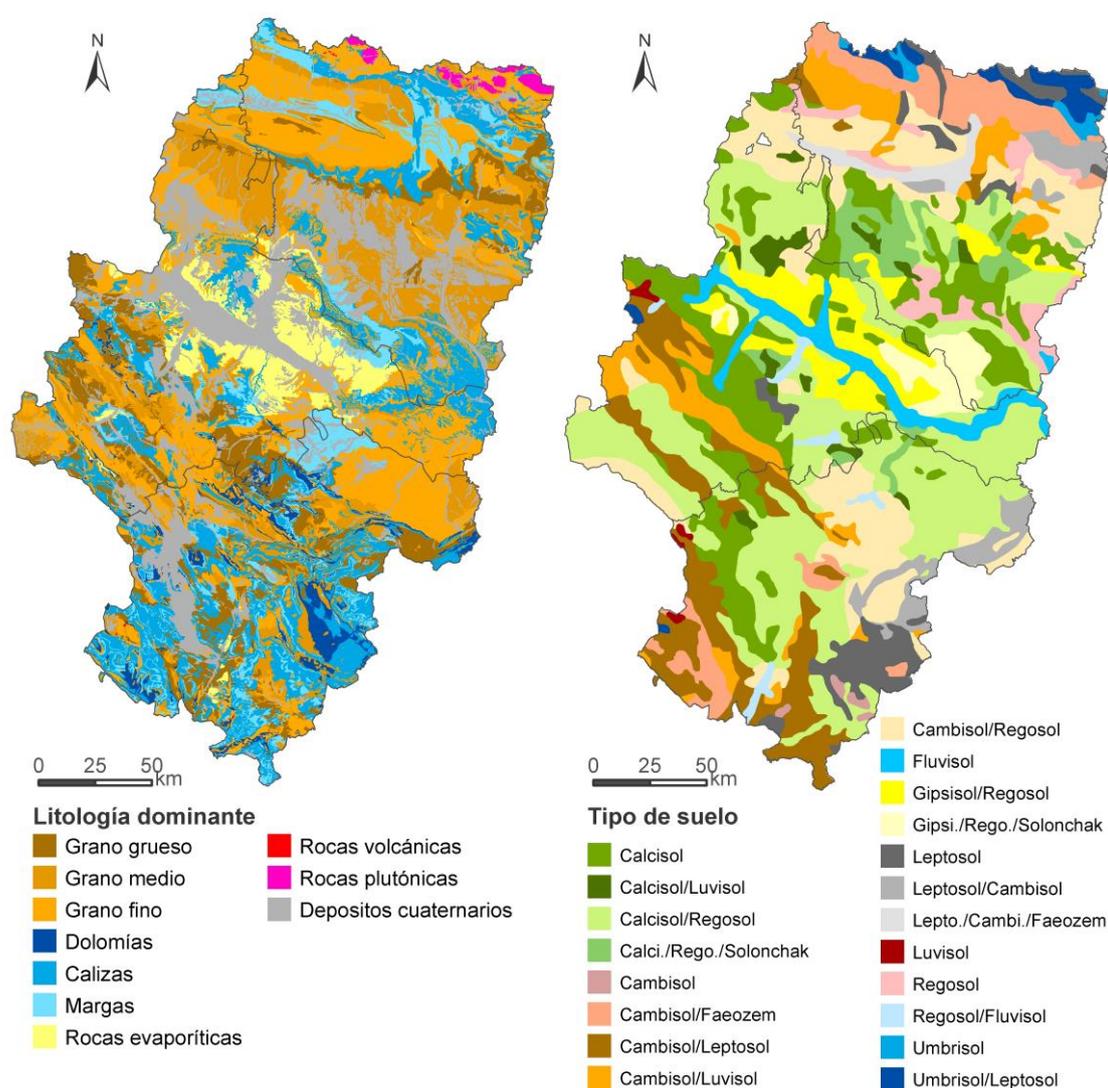


Figura 3.58. (Izquierda): Mapa litológico de Aragón. Elaboración propia a partir de la información contenida en el Sistema de Información sobre Recursos y Medio Ambiente (Instituto Aragonés del Medio Ambiente, 1993)

Figura 3.59. (Derecha): Cobertura edáfica de Aragón. Elaboración propia a partir de la información de la página web del Grupo de investigación iARasol (2007).

Como puede ser observado en el mapa, las rocas carbonatadas se extienden por gran parte del territorio. No obstante, existe una clara concentración de este tipo de rocas, ya sean calizas, dolomías o margas, en las áreas más elevadas del Sistema Ibérico, especialmente notable en los dominios turolenses. Las rocas carbonatadas son también dominantes en las Sierras pirenaicas interiores y exteriores, así como en el margen septentrional del valle del Ebro.

Las rocas evaporíticas son especialmente abundantes en la zona central de la depresión del Ebro, en el entorno de la ciudad de Zaragoza. Prácticamente todo el resto de la región se encuentra dominada litológicamente por rocas detríticas de distinto tamaño de grano, a excepción de pequeñas manchas constituidas por rocas plutónicas y rocas de origen volcánico. Por su parte, las áreas deprimidas de los grandes valles (Ebro, Jiloca, Gállego y Cinca, entre otros) se encuentran cubiertas por materiales recientes del periodo Cuaternario.

Por su parte, la textura y la composición de la cubierta edáfica poseen una cierta capacidad para evitar la propagación de los contaminantes procedentes de la actividad minera y del drenaje ácido de mina. Un suelo poco poroso ejercerá una mayor impedimento para el paso de las soluciones peligrosas, reteniendo más tiempo los contaminantes, lo que aumentará las probabilidades de que estos se adhieran a las superficies minerales o entren dentro de su estructura por intercambio iónico o incorporación estructural (Oyarzun et al., 2011). Por otra parte, la aparición de horizontes carbonatados o ricos en materia orgánica, así como la presencia de fragmentos de algunos minerales reactivos, como los feldespatos, favorecerá el desarrollo de reacciones químicas con capacidad de neutralizar la acidez presente en esos flujos contaminantes. Los suelos arenosos formados por granos gruesos de minerales no reactivos, como el cuarzo, conforman la situación más propicia para el esparcimiento de los frentes de contaminación.

Según el mapa de suelos de Aragón ofrecido en la página web del grupo iARasol (Badía, Ibarra, Longares, y Martí, 2007) existen 10 tipos principales en el territorio (Figura 3.59.), llegando hasta la veintena si se tienen en cuenta las coberturas edáficas con características intermedias entre estas 10 clases básicas. La distribución de los diversos tipos del suelo en el

territorio aragonés es muy heterogénea, si bien dominan las coberturas edáficas de tipo Calcisol o sus combinaciones. Estos suelos son los dominantes en gran parte de la Cordillera Ibérica, Bajo Aragón, Cinco Villas y el somontano pirenaico. El nombre de este tipo de suelo hace alusión a una sustancial acumulación de caliza secundaria, siendo el más interesante en el contexto de esta tesis debido a su capacidad de tamponamiento de las soluciones ácidas.

El tipo de suelo conocido como Cambisol es particularmente abundante en las áreas elevadas de la región, tanto de los Pirineos como de la Cordillera Ibérica. Se trata de un suelo que se origina sobre depósitos aluviales, coluviales o eólicos de materiales alterados ricos en bases, por lo que su capacidad reactiva, debido a su porosidad y composición, será nula. En otras zonas montañosas de la comunidad, como es el caso de las sierras ibéricas de Gúdar y el Maestrazgo, el Leptosol es el suelo predominante, mientras que los Umbrisoles presentan un cierto dominio en el Pirineo Axial. Tanto los Leptosoles como los Umbrisoles presentan cierta capacidad de tamponamiento frente a las soluciones ácidas, debido a su desarrollo sobre materiales calcáreos, en el caso del Leptosol, y a la presencia en los Umbrisoles de materia orgánica en su horizonte superficial. Los suelos conocidos con el nombre de Feozem, caracterizados por la presencia de un horizonte superficial de color oscuro debido a su alto contenido en materia orgánica, va a ser otro de los tipos de suelo más interesantes en el contexto minero tratado en esta tesis. Aparecen en la comunidad combinados con otros, siendo comunes en el área pirenaica occidental, parte de las Sierras Exteriores, el margen oriental de la Sierra de Albarracín y algunos puntos del Maestrazgo y las Cuencas Mineras turolenses.

La zona central de la depresión del Ebro, en la que se emplazan importantes depósitos de yesos y sales, está dominada por la presencia de Gipsisoles, mientras que el Fluvisol es la cobertura edáfica predominante en la llanura de inundación del río Ebro. Los Gipsisoles forman acumulaciones de materiales no reactivos pero impermeables, de modo que dificultan la penetración de la solución contaminante hacia horizontes más profundos.

La permeabilidad o conductividad hidráulica, en hidrogeología, se define como la facilidad que presenta un medio a ser atravesado por un fluido. La permeabilidad es un factor muy importante en la propagación de posibles soluciones acuosas contaminadas como

consecuencia de la actividad minera, puesto que el agua no es solo un elemento susceptible de ser contaminado, si no que a su vez como actúa como el principal agente de transporte de la propia contaminación. Los medios impermeables impedirán la penetración de las aguas contaminadas en el seno de suelos y rocas, evitando así la perturbación de los acuíferos. Hablando de las balsas de almacenamiento de residuos, las fugas y las infiltraciones de aguas contaminadas pueden ser minimizadas si estas son colocadas sobre cubiertas impermeables. Cuanto más impermeable sea el medio, más fácil será el aislamiento de los terrenos que ocupen las balsas y, en cualquier caso, cuanto menor sea la conductividad hidráulica menor será la dispersión de los frentes contaminantes. Si la contaminación por aguas cargadas de elementos contaminantes queda restringida a una porción pequeña del sustrato edáfico será más fácilmente restaurable que si la dispersión de los contaminantes es mayor o alcanza las masas de agua subterránea.

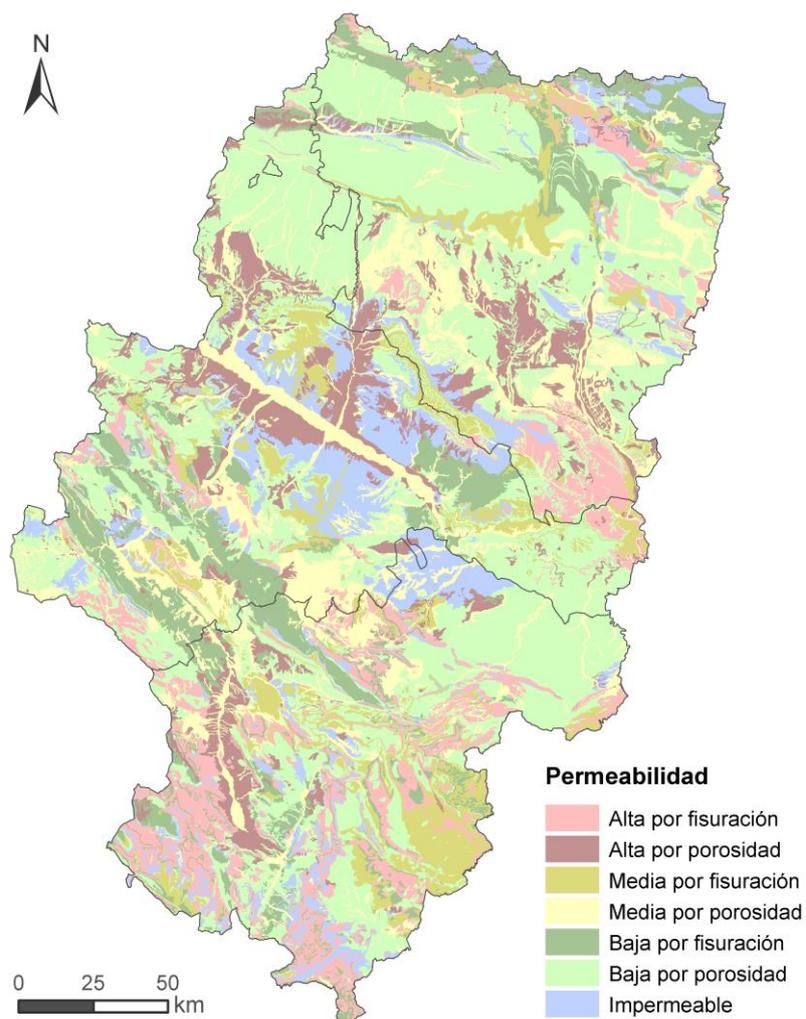


Figura 3.60. Mapa de permeabilidad del territorio aragonés. Elaboración propia a partir de la información contenida en el Sistema de Información del Medio Ambiente de Aragón (Instituto Aragonés del Medio Ambiente, 1993).

La permeabilidad también influye en la recarga de los acuíferos, si bien en este caso serán los terrenos con mayor conductividad hidráulica los que facilitarán la penetración de las aguas de precipitación hacia las masas de agua subterráneas.

En el mapa de permeabilidad de Aragón (Instituto Aragonés del Medio Ambiente, 1993), analizando las características físicas de las rocas y de los suelos que cubren el territorio aragonés, los autores compartimentaron el territorio en función de sus valores de permeabilidad, atendiendo al nivel y origen de la misma (Figura 3.60.). Los valores de permeabilidad de las diferentes *teselas* que componen el mapa de la región aragonesa no muestran un patrón tan definido como el que podía observarse en los mapas relativos a otras variables del medio físico. No obstante, a la vista del mapa sí puede extraerse que los

valores más altos de permeabilidad suelen estar asociados a zonas correspondientes a llanuras de inundación localizadas en grandes valles, como por ejemplo en la cuenca del Jiloca o la depresión del Ebro. Las sierras calcáreas del sistema Ibérico también presentan valores de permeabilidad alta, en este caso por fisuración. En general, la permeabilidad por porosidad está asociada a zonas dominadas por la dinámica fluvial, mientras que la permeabilidad por fisuración es más típica de áreas montañosas, con rocas bien consolidadas.

Finalmente, las superficies impermeables se localizan principalmente en los materiales arcillosos situadas a ambos márgenes del río Ebro pero a una cierta distancia de él, y en zonas de alta montaña del Pirineo, aunque en este caso la impermeabilidad se derive de la presencia de rocas compactas carentes de fisuración.

Para concluir el apartado relacionado con las características físicas de la región serán analizados sus aspectos climáticos fundamentales. En el apartado introductorio del Atlas Climático de Aragón (Martín, Mollet, y Prats, 2007) se advierte de que aunque la Comunidad Autónoma aragonesa se incluye dentro del ámbito del clima mediterráneo continentalizado, con inviernos fríos y veranos calurosos y secos, los valores y características de este tipo de clima se ven modificados por la topografía de la región. Estas diferencias en el relieve dan lugar a una amplia gama de ambientes climáticos, que ofrecen grandes contrastes entre los diversos territorios que componen la comunidad. A continuación, se ofrecerá un breve resumen de las características climáticas que van a jugar un papel determinante como variables de algunos de los indicadores propuestos para el análisis de los yacimientos e indicios minerales presentes en la región.

Los factores climáticos van a ser fundamentales en el estudio de la capacidad del medio para generar el drenaje ácido de minas. La disponibilidad de agua procedente de la precipitación y las temperaturas más elevadas van a favorecer el desarrollo de esta forma de contaminación, así como de otros tipos de perturbaciones relacionadas con la actividad minera. Por otro lado, la precipitación registrada en cada punto del territorio va a influir en la recarga de los acuíferos, otro de los indicadores empleados en el análisis.

A grandes rasgos, en la geografía aragonesa se aprecia una clara correlación entre temperatura media anual y la elevación sobre el nivel del mar. Las áreas más cálidas, con temperaturas medias anuales que superan los 14°C, se localizan en la zona central de la región, a lo largo de la depresión del Ebro, la zona topográficamente más deprimida. La Rivera Baja del Ebro es la que muestra unos valores de temperatura media más elevados (>15°C), valores máximos que se extienden también por los tramos finales de los ríos Cinca y Alcanadre.

La temperatura media anual (Figura 3.61.) desciende conforme aumenta la distancia, hacia el sur o hacia el norte, al valle del Ebro, consecuencia de un progresivo aumento de la elevación sobre el nivel del mar. Este descenso es más acusado en el margen del Sistema Ibérico con la depresión del Ebro, mientras que las temperaturas medias anuales siguen siendo elevadas, dentro del contexto geográfico aragonés, en el somontano oscense y la zona centro meridional de la comarca de las Cinco Villas, así como en el valle del Jalón, dentro del Sistema Ibérico. El descenso a partir de las Sierras Exteriores Pirenaicas se hace mucho más acusado.

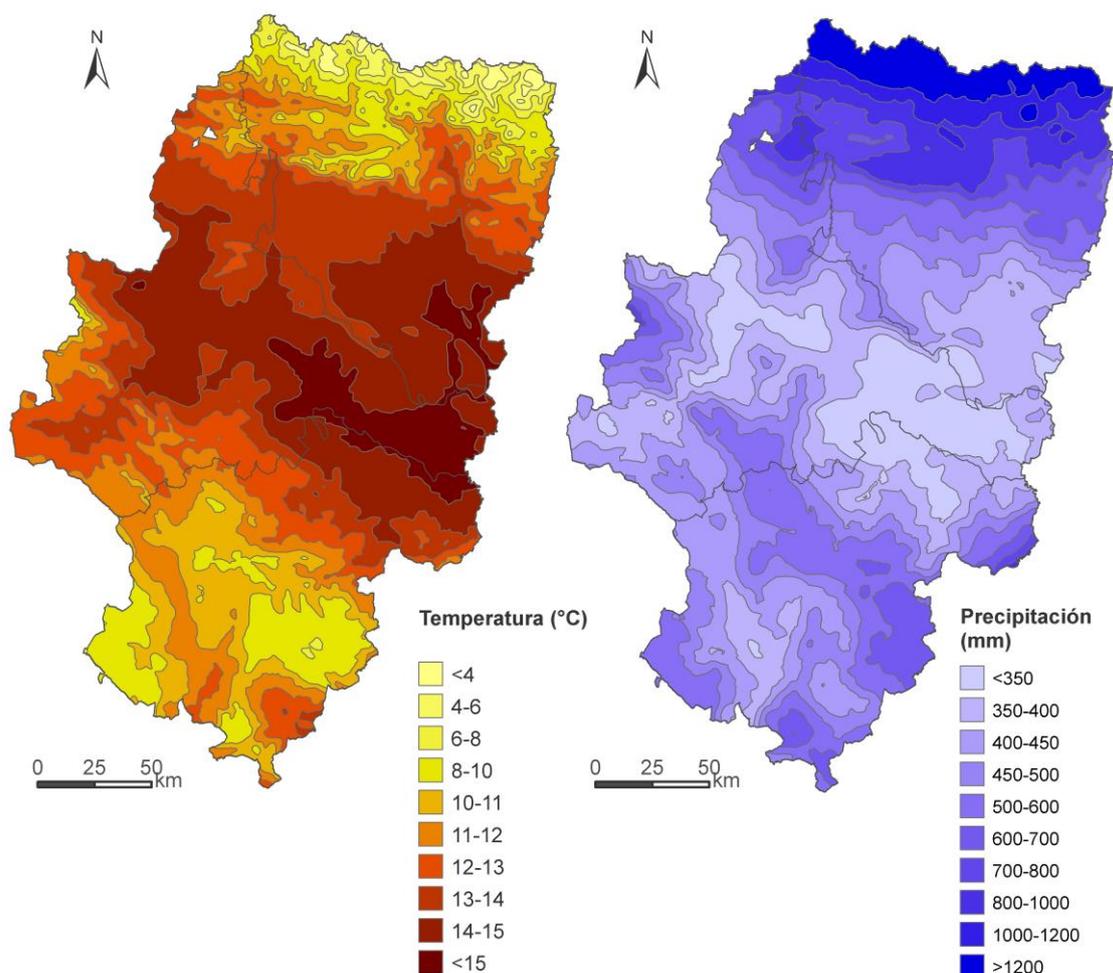


Figura 3.61. (Izquierda): Temperatura media anual. Elaboración propia a partir de datos del Atlas Climático de Aragón.

Figura 3.62. (Derecha): Precipitación media anual. Elaboración propia a partir de información del Atlas Climático de Aragón.

Los valores mínimos de temperatura media se localizan en las zonas montañosas de la comunidad, coincidiendo con las serranías más elevadas del Sistema Ibérico (Albarracín, Gúdar-Javalambre y Maestrazgo), y, especialmente, en todo el eje Pirenaico. En diversos puntos de esta cordillera los valores de temperatura medios anuales no superan los 4°C. En el Sistema Ibérico, la configuración topográfica que sirve de abrigo a cuencas como las del Jiloca o la del Turia, condiciona que estas áreas presenten unos registros de temperatura media anual superiores a los que cabría esperar debido a su elevación sobre el nivel del mar.

En cuanto a las precipitaciones registradas en el territorio aragonés, lo que las caracteriza de forma primordial, es su escasez (Figura 3.62.), fundamentalmente debido a la dificultad

de penetración de los frentes atmosféricos (Martín et al., 2007). Una muestra clara de la exigüidad de precipitaciones en el territorio aragonés lo manifiesta el hecho de que más del 60% del mismo recibe precipitaciones anuales menores a los 500 mm, valores propios de regiones semiáridas.

Al igual que sucedía en el caso de las temperaturas, las precipitaciones totales anuales también se ven fuertemente condicionadas por las características topográficas del territorio, aumentando estas a medida que se asciende sobre el nivel del mar. Las zonas de la geografía aragonesa que reciben una cantidad menor de precipitaciones, con valores por debajo de los 400 mm, se corresponden con áreas topográficamente deprimidas, localizadas principalmente en todo el corredor del Ebro, incluyendo el bajo Cinca y las comarcas turolenses del Bajo Aragón y el Bajo Martín. Valores igualmente exigüos de precipitación se registran tanto en el valle de Jalón como en la cuenca del Turia y en la parte meridional de la fosa del Jiloca.

Como ya se ha comentado, las precipitaciones totales anuales serán progresivamente más altas al reducirse la distancia con los relieves marginales del territorio aragonés desde la zona central más árida. Serán en estas únicas zonas, Pirineos y, en menor medida, las serranías más altas de la Ibérica, donde se alcancen registros de precipitación destacables. Esto es consecuencia de la mejor exposición de las áreas montañosas a los frentes lluviosos y de la influencia del relieve que favorece las lluvias de inestabilidad y orográficas (Martín et al., 2007). En cualquier caso, y al igual que ocurría con la temperatura, el gradiente pluviométrico altitudinal es más pronunciado en los somontanos de la Ibérica y más suave en su ascenso hasta las Sierras Exteriores y los Pirineos. Por otro lado, y posiblemente debido a la influencia marina, en la comarca turolense del Matarraña se alcanzan valores de precipitación mucho más altos de los que se registran en otras zonas con elevaciones superiores.

En relación con el drenaje ácido de minas, principal proceso derivado de la minería en relación con los factores climáticos, si se considera exclusivamente la temperatura, será el sector central de la región, desde las Sierras Exteriores hasta el somontano de la Ibérica, incluyendo el valle del Jalón, el que presentará unas condiciones más adecuadas para su

generación. Por otra parte, la disponibilidad de agua procedente de la precipitación inicia el proceso generador del drenaje ácido de mina, así como aumenta la capacidad de expansión de la misma. Atendiendo a la distribución de las precipitaciones en el territorio aragonés, la zona más favorable para que se produzcan estos procesos coincidirá con la totalidad del frente pirenaico, desde las Sierras Exteriores hasta la frontera con Francia. En el siguiente apartado serán analizados estos dos factores en su conjunto, como método para estimar la generación del drenaje ácido de minas en el contexto territorial aragonés, así como la capacidad del medio para reaccionar ante este producto del proceso minero, minimizando su gravedad.

#### *3.4.1.2. Drenaje ácido de mina en el contexto regional aragonés*

Todas las características del territorio aragonés consideradas hasta el momento, incluida la pendiente, participan en la generación, propagación y mitigación del drenaje ácido de mina y otros frentes contaminantes. Debido al interés propio que presenta la pendiente en otros factores relacionados con la actividad minera, esta no será incluida en los análisis correspondientes a este indicador. En este punto, y tras el repaso de todos los factores intervinientes en el proceso, se ha considerado interesante comprobar cómo se conjugan en el territorio, para poder así determinar qué áreas del territorio aragonés serán más propensas a la generación y propagación de los frentes contaminantes derivados de la actividad minera y cuáles presentan unas características que favorecen la mitigación de los mismos.

Aduvire (2016) incluye entre los factores determinantes de la velocidad de generación del drenaje ácido de mina características como el Eh-pH, el tamaño de las partículas del mineral, la presión parcial del oxígeno, la concentración de bacterias o el contenido en nutrientes del medio. En esta lista se encuentran recogidas variables de naturaleza local, en algunos casos muy inconstantes desde el punto de vista temporal, e inmanejables a una escala de trabajo como la empleada en este proyecto. No obstante, algunos factores climáticos, concretamente la temperatura y, especialmente, la disponibilidad de agua poseen un fuerte influjo en el proceso de generación del drenaje ácido de minas y otras formas de contaminación. Afortunadamente, tanto la temperatura como la disponibilidad de agua son

aspectos del territorio ampliamente estudiados a escala regional, y la información disponible sobre ellos es mucha.

Como la temperatura y, especialmente, la disponibilidad de agua son dos elementos clave en el proceso de generación del drenaje ácido, así como de otras formas de contaminación nocivas para el medio, se decidió compartimentar el territorio en función de su hipotético potencial para iniciar estos tipos de procesos químicos según sus características climáticas. La combinación de las clases referentes a las temperaturas y a las precipitaciones resultará en el mapa que representa el potencial de generación y difusión de drenaje ácido basado en aspectos climáticos (Figura 3.63.). Hay que destacar que este resultado es solo una hipótesis válida para el contexto territorial aragonés, ya que las jerarquizaciones de temperaturas y precipitaciones utilizadas están basadas exclusivamente en los registros anuales de esta comunidad.

El mapa que muestra el potencial climático del territorio para la generación y propagación de drenaje ácido de mina indica que, en Aragón, las zonas más proclives para que ocurran estos procesos químicos se localizan principalmente en los Pirineos y las Sierras Exteriores, especialmente en sus facciones central y occidental. A pesar de ser zonas bastante frías dentro del contexto geográfico aragonés, los registros pluviométricos son muy superiores al resto del territorio. La única zona que muestra un potencial muy alto fuera de los Pirineos y las Sierras Exteriores se localiza en la Sierra de Encanade (Puertos de Beceite). Se trata de un territorio con temperaturas moderadamente altas y precipitaciones abundantes.

El resto de los Pirineos y las Sierras Exteriores presentan un potencial alto. La diferencia radica en unos registros pluviométricos más bajos que los de las zonas analizadas en el párrafo anterior. El potencial también es alto en los somontanos oscenses y en el frente del Sistema Ibérico más cercano al valle del Ebro, así como en el resto de la comarca del Matarraña y en la Sierra de Javalambre. En estas zonas se conjugan temperaturas y precipitaciones de moderadas a altas. Las zonas con potenciales clasificados como más bajos se localizan en forma de manchas dispersas en el entorno de la ciudad de Teruel. Se corresponden con áreas deprimidas localizadas en las fosas del Jiloca, Alfambra y Turia, que

reciben pocas aportaciones de agua en forma de precipitación y donde las temperaturas medias anuales son relativamente bajas.

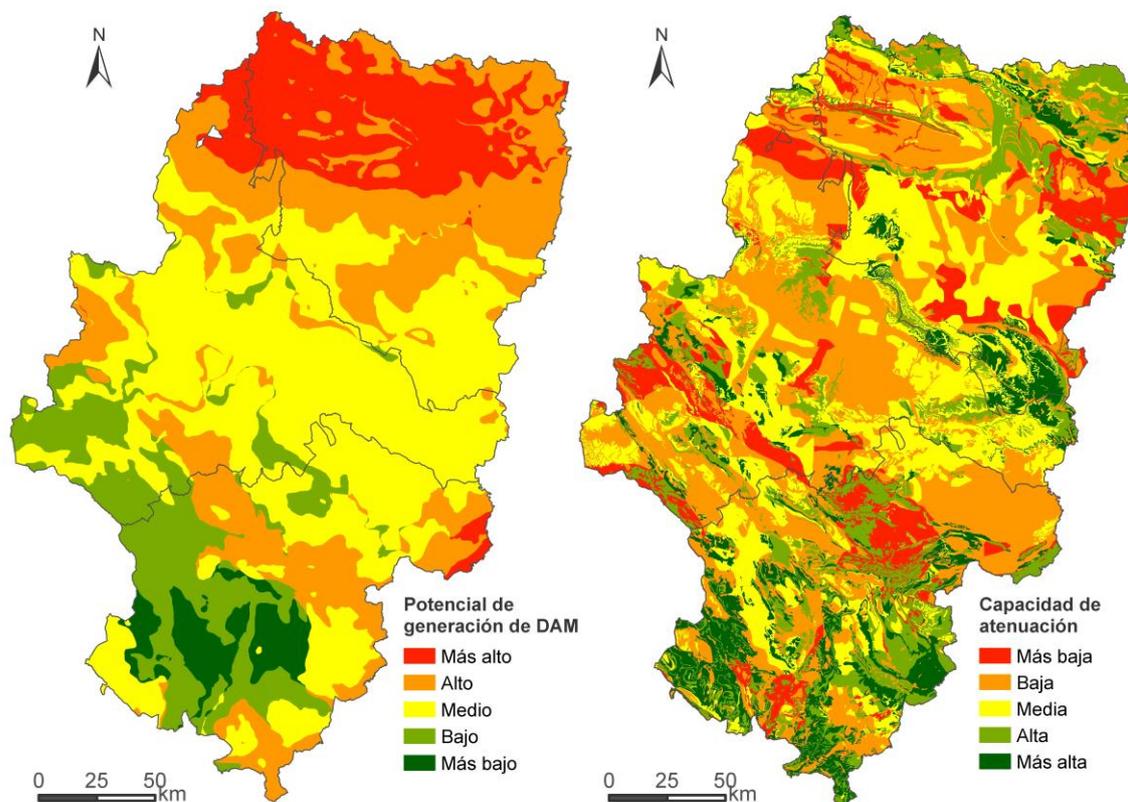


Figura 3.63. (Izquierda): Potencial de generación de DAM en Aragón en función de la temperatura y precipitación media anual. Elaboración propia.

Figura 3.64. (Derecha): Capacidad de atenuación del medio frente al drenaje ácido de minas basado en características litológicas, edáficas y de permeabilidad. Elaboración propia.

Por otro lado, igual que algunos elementos y procesos naturales del medio agravan los impactos derivados de la actividad minera existen ciertos condicionantes que tienden a amortiguar los efectos de los efluvios contaminantes y a limitar su extensión. Algunos de los minerales que conforman las rocas y ciertos compuestos presentes en las partículas constituyentes de los suelos poseen la capacidad de reaccionar con las soluciones ácidas procedentes de las labores mineras mitigándolas. La permeabilidad de los materiales que configuran la superficie terrestre en cada punto del territorio también jugará un factor clave en la propagación de estas soluciones contaminantes. Dentro de este apartado se tomarán en consideración la litología del encajante, la tipología de suelos presente en el territorio y

los valores de permeabilidad del medio, como forma de valorar la capacidad del terreno para atenuar y limitar la expansión de los frentes contaminantes.

La Figura 3.64. muestra una división del territorio en función de su capacidad para amortiguar el efecto del drenaje ácido de minas y otras efluentes contaminantes en base a la litología predominante, la cobertura edáfica y la permeabilidad. Gran parte del territorio muestra una capacidad de amortiguamiento bajo o medio. Las categorías correspondientes a los grados de atenuación alta o muy alta se localizan principalmente en las serranías calcáreas del Sistema Ibérico, esencialmente en la Sierra de Albarracín (con la excepción del Macizo del Tremedal) y las sierras de Gúdar, Javalambre y el Maestrazgo. También son frecuentes, aunque menos extensas, en parte del Pirineo axial y de las Sierras Exteriores.

El mapa que conjuga tanto los factores generadores con los atenuadores, y cuya información fue la empleada en la valoración de los recursos inventariados en la base de datos, puede ser observado en el Anexo I (Mapa AT3).

#### *3.4.1.3. Hidrografía, canalizaciones de agua y acuíferos*

La disponibilidad de agua es imprescindible en diversos procesos ligados a la actividad minera. En los trabajos extractivos, este recurso se destina a la refrigeración, limpieza y lubricación de las perforaciones y de las herramientas de corte. En terrenos muy secos, el agua es utilizada también para la humidificación de los caminos que llevan a las canteras, ya que el paso de maquinaria pesada puede provocar el levantamiento de polvos nocivos para la salud humana y la propia maquinaria. Es también un componente esencial en hidrometalurgia, proceso en el que el uso de soluciones acuosas como agentes de disolución es generalizado. Se trata de un proceso muy extendido, por ejemplo, en la minería del cobre, que requiere de la disponibilidad de caudales de agua muy importantes, del orden de 11,8 m<sup>3</sup>/seg (Betancour, 2018). También es esencial la disponibilidad de agua en procesos postextractivos como la fundición y refinería, para el transporte de minerales y en el almacenaje de los residuos mineros.

El acceso al agua que suministran los ríos, canalizaciones, embalses, acuíferos y depósitos sirve para evaluar la calidad de la inserción territorial, como será analizado en el cuarto

capítulo de la tesis. Por otro lado, las explotaciones de los diversos tipos de aguas de los que se obtiene un beneficio económico en la región están condicionados a la presencia de acuíferos en el territorio que las nutran. Conocer la distribución de estas masas de agua en el territorio, así como su capacidad de recarga es un parámetro esencial en la valoración de la aptitud del terreno para este tipo de recursos.

El Atlas de Aragón expone que la red fluvial de la Comunidad Autónoma de Aragón alcanza los 6.152 km, incluyendo los cursos fluviales principales, afluentes y subafluentes, tanto de caudal continuo como temporal (Figura 3.65.). La red fluvial aragonesa se encuentra englobada en tres grandes cuencas hidrográficas, la del Ebro, la del Júcar y la del Tajo. El Ebro es el principal río que recorre la región, siendo además el más caudaloso a nivel nacional. Este río discurre desde la Cordillera Cantábrica hasta el Mediterráneo, atravesando el territorio aragonés de oeste a este y cruzando la ciudad de Zaragoza. Más del 80% del territorio aragonés se encuentra dentro de los límites de la Confederación Hidrográfica del Ebro. No en vano, todos los ríos que nacen en la vertiente aragonesa de los Pirineos desaguan en el Ebro, igual que una parte importante de los procedentes de la Cordillera Ibérica. Dentro de estos afluentes destacan, por la margen izquierda, y procedentes de los Pirineos, los ríos Aragón, Gállego, Cinca, Alcanadre (afluente del Cinca), y Noguera Ribagorzana. Los afluentes del Ebro procedentes del Sistema Ibérico más importantes son el Jalón, el Jiloca (afluente del Jalón), Huerva, Aguas Vivas, Martín, Guadalope y Matarraña.

Dentro del territorio aragonés, la segunda confederación hidrográfica por extensión es la del Júcar. Esta confederación incluye varios ríos de entidad que desembocan en la costa del levante valenciano, lo que condiciona la existencia de cinco subcuencas. En Aragón pueden encontrarse hasta tres de ellas: la del Mijares, la del Turia y la del propio Júcar. El río Tajo, el más largo de la Península Ibérica, nace en la Sierra de Albarracín. Las zonas de esta comarca que vierten sus aguas a este río, o a algunos de sus afluentes, pertenecerán a la Confederación Hidrográfica del Tajo

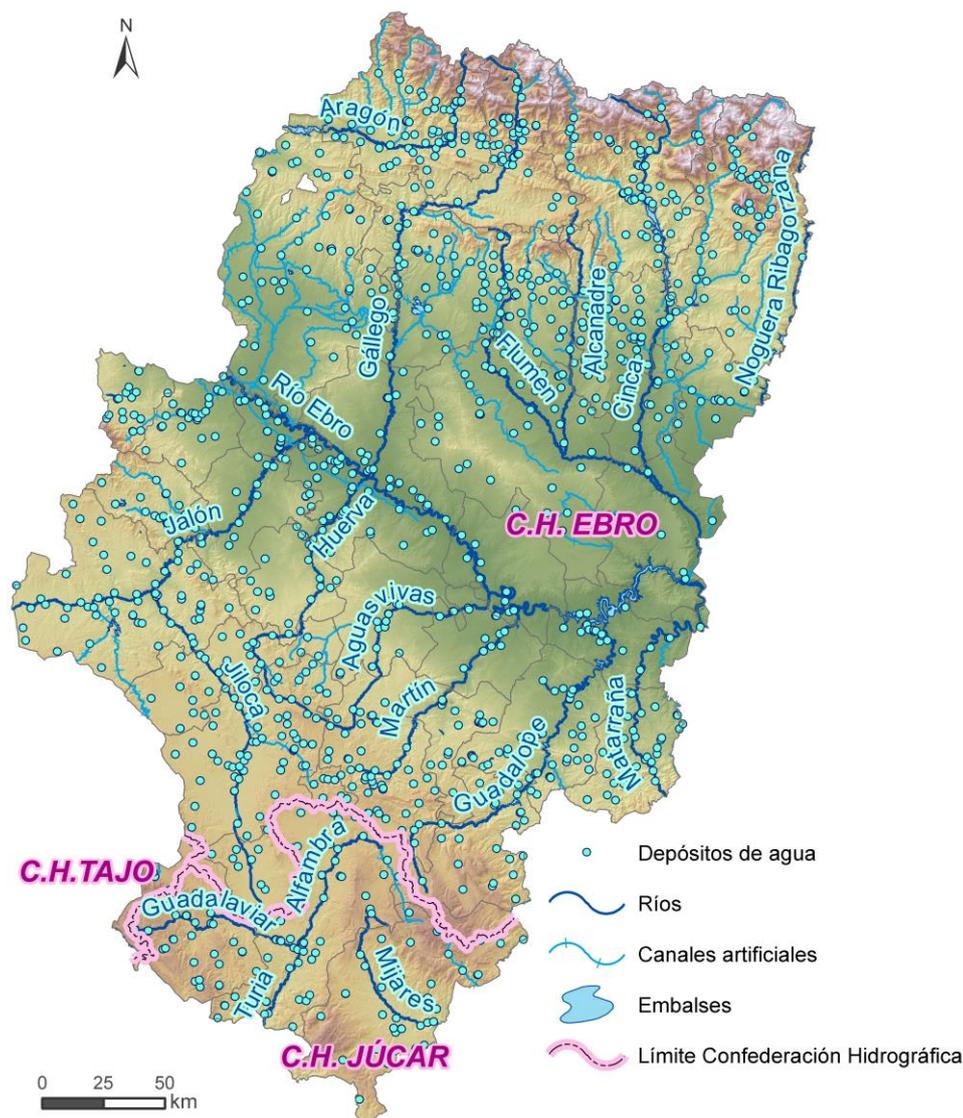


Figura 3.65. Red hidrográfica, canales y embalses artificiales y depósitos de agua. Elaboración propia.

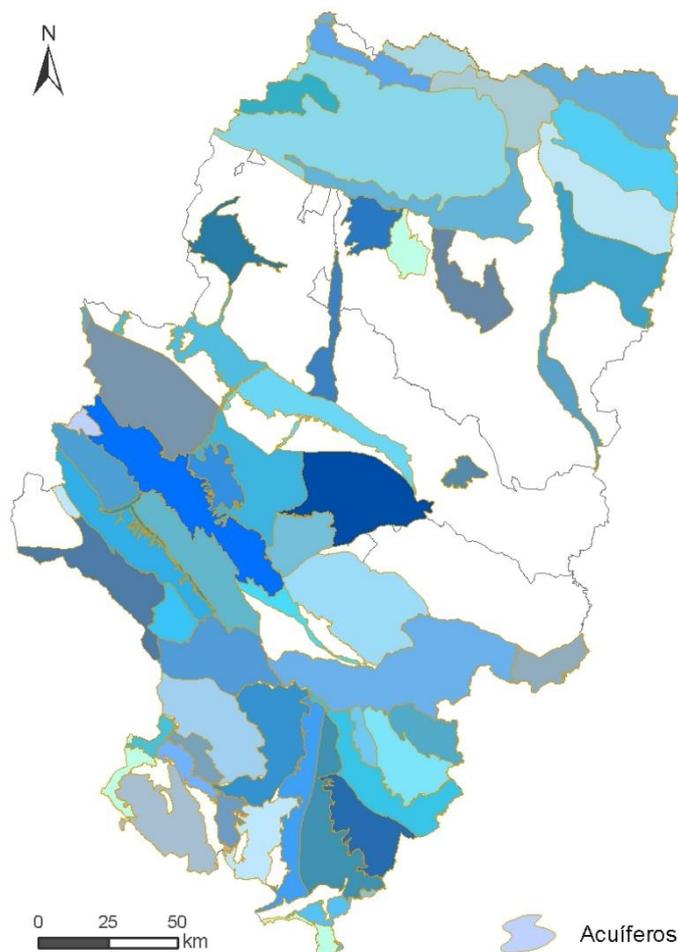
A los recursos hidrográficos naturales apenas analizados, se añaden los que proporcionan los canales artificiales, las masas de aguas superficiales y los depósitos de agua, para poder ser utilizados en la diferentes fases del proceso extractivo. Debido al gran desarrollo de la actividad agrícola en una facción importante de la región, son comunes las canalizaciones artificiales de agua, normalmente para el regadío de campos de cultivo, aunque también existen los destinados a otras finalidades, como la industrial o la generación de energía. A pesar de que estos tipos de canalizaciones presentan un tamaño y caudal variable, desde pequeñas acequias para riego hasta grandes canales, en el mapa representado en la Figura 3.65. se muestran solo los relevantes a escala regional. La mayoría de estos grandes canales

que surcan el territorio aragonés se localizan en zonas llanas, o relativamente llanas, de la depresión del Ebro y del somontano pirenaico, en las provincias de Zaragoza y Huesca.

Los pantanos y embalses de origen antrópico son los que más relevancia van a adquirir a lo largo de esta tesis, puesto que son los que pueden ofrecer unas posibilidades de uso real de cara al desarrollo de la actividad minera. El Atlas de Aragón especifica que en la región se localizan un total de 93 embalses, de los cuales 92 se localizarán dentro de la cuenca hidrográfica del Ebro y uno en la del Júcar. La mayor parte de estos embalses se sitúan en el Pirineo y el Prepirineo, por sus condiciones orográficas, la disponibilidad de caudales y la necesidad de regular los ríos («Atlas de Aragón», s. f.). En la Cordillera Ibérica, por el contrario, solo se localizan 14 embalses. Curiosamente, el mayor embalse de Aragón no se localiza en los Pirineos, sino en la depresión del Ebro, cerca de la frontera con Cataluña (Embalse de Mequinenza).

Los depósitos de agua son muy numerosos y se encuentran distribuidos de una forma bastante homogénea por todo el territorio.

Los acuíferos, por su parte, son el componente esencial del indicador correspondiente a la dimensión *Aptitud del territorio* que valora su capacidad de recarga. Por otro lado, la presencia de acuíferos en el territorio será el elemento que aporte un peso mayor al resultado del análisis correspondiente al acceso a los recursos hídricos, al tener la capacidad de aportar mayores caudales que el resto de elementos hidrográficos analizados hasta el momento.



*Figura 3.66. Masas de agua subterráneas en la Comunidad Autónoma de Aragón. Elaboración propia a partir de datos procedentes de las Confederaciones Hidrográficas del Ebro, Júcar y Tajo.*

Como muestra el mapa representado en la Figura 3.66., gran parte del subsuelo aragonés está ocupado por acuíferos, especialmente en la provincia de Teruel. En ella, bajo las montañas de las diferentes serranías Ibéricas, existen numerosas masas de agua subterránea. La excepción es la comarca del Bajo Aragón, casi desprovista de masas de agua subterránea. Algo parecido ocurre en la provincia de Zaragoza, en la que los acuíferos se localizan esencialmente bajo la Cordillera Ibérica, sin contar con los aluviales de la ribera alta del Ebro y el bajo Gállego. Existen grandes acuíferos en todo el norte de la provincia de Huesca bajo la zona pirenaica y de las Sierras Exteriores, mientras que el sur de territorio oscense se encuentra desprovisto, casi completamente, de masas de agua subterránea.

#### 3.4.1.4. Riesgos Geológicos y Climáticos

Lo que definimos como riesgos naturales son en realidad procesos que han sucedido de forma continua desde la formación de la tierra, pero que se convierten en una amenaza cuando interactúan con los intereses humanos, afectando a sus bienes y propiedades o incluso a las propias vidas. Existen dos tipos principales de riesgos naturales, los riesgos geofísicos, y los riesgos biológicos, siendo los primeros los únicos que van a ser analizados en la tesis, tanto por el impacto que suponen en cualquier actividad humana, incluyendo la minería, como por el hecho de ser, en parte, predecibles. Una característica importante de los riesgos geofísicos es que suele tratarse de sucesos repetitivos y, por lo tanto, susceptibles de ser controlados con el fin de trazar y predecir su futura actividad, a partir de información basada en la frecuencia de sucesos pasados y sus pautas de incidencia (Keller y Blodgett, 2004). A partir de estos análisis pueden ser elaborados mapas de riesgo, que aportarán una información determinante a la hora de realizar labores de planificación.

El valor localizado de la minería, que impone desarrollar los trabajos de extracción allí donde se localiza el cuerpo mineralizado, implica que en su desarrollo se deberán asumir un cierto grado de inseguridad si el yacimiento se localiza en una zona proclive a sufrir algún tipo de riesgo. Por suerte, en muchas ocasiones las consecuencias de los riesgos pueden ser minimizadas, pero, en muchas otras, las secuelas de los mismos están fuera de todo control. De cualquier forma, para poder ejercer acciones que ayuden a minimizar los daños producidos por estos procesos naturales catastróficos será imprescindible tener una buena base de conocimiento sobre ellos, incluyendo información referente a dónde es probable que ocurra un fenómeno concreto y la probabilidad de que este suceda en esa localización dentro de un periodo de tiempo determinado.

En esta tesis se han tenido en cuenta solo aquellos riesgos naturales relativamente frecuentes dentro del contexto aragonés, como es el caso del riesgo asociado a inundaciones y aquellos que, aunque infrecuentes, tienen una elevada capacidad destructiva, por ejemplo, el riesgo sísmico. En concreto fueron analizados el riesgo sísmico, el riesgo por deslizamientos, el riesgo de colapsos, el riesgo de inundaciones, la probabilidad de fenómenos tormentosos y el riesgo por vientos fuertes.

Los terremotos de cierta magnitud pueden tener efectos económicos nefastos en la actividad minera. Por un lado, son capaces de destruir las infraestructuras destinadas a tal fin, como carreteras, tuberías de conducción de agua o combustible, líneas eléctricas o edificios auxiliares de oficina, almacén, etc. La destrucción de estas paralizaría las tareas mineras durante un cierto periodo de tiempo, con el perjuicio económico que esto supondría. Otras estructuras afectadas serían las escombreras, cuya desestabilización como consecuencia del temblor, podría acrecentar el riesgo de deslizamiento de los materiales en ellas almacenados. También sería probable que el movimiento sísmico favoreciera la desestabilización de la propia mina o cantera, con el consiguiente riesgo para las vidas humanas.

La rotura de balsas en las que se almacenan materiales peligrosos generaría problemas ambientales de elevada entidad. Según Oyarzun, Higuera y Lillo (2011) la mala respuesta ante la actividad sísmica puede provocar en las balsas fenómenos de licuefacción durante el terremoto que lleven a un fallo masivo del sistema de contención.

El mapa de riesgo sísmico empleado en esta tesis fue efectuado a partir de los datos del mapa de Peligrosidad Sísmica de España (Centro Nacional de Información Geográfica, 2015), tomando la información relativa a la Comunidad Autónoma de Aragón (Figura 3.67). Para ello se estableció una zonificación compuesta cinco categorías diferentes, incluyendo en la de peligrosidad más alta las áreas que poseen unos valores más elevados dentro del contexto aragonés.

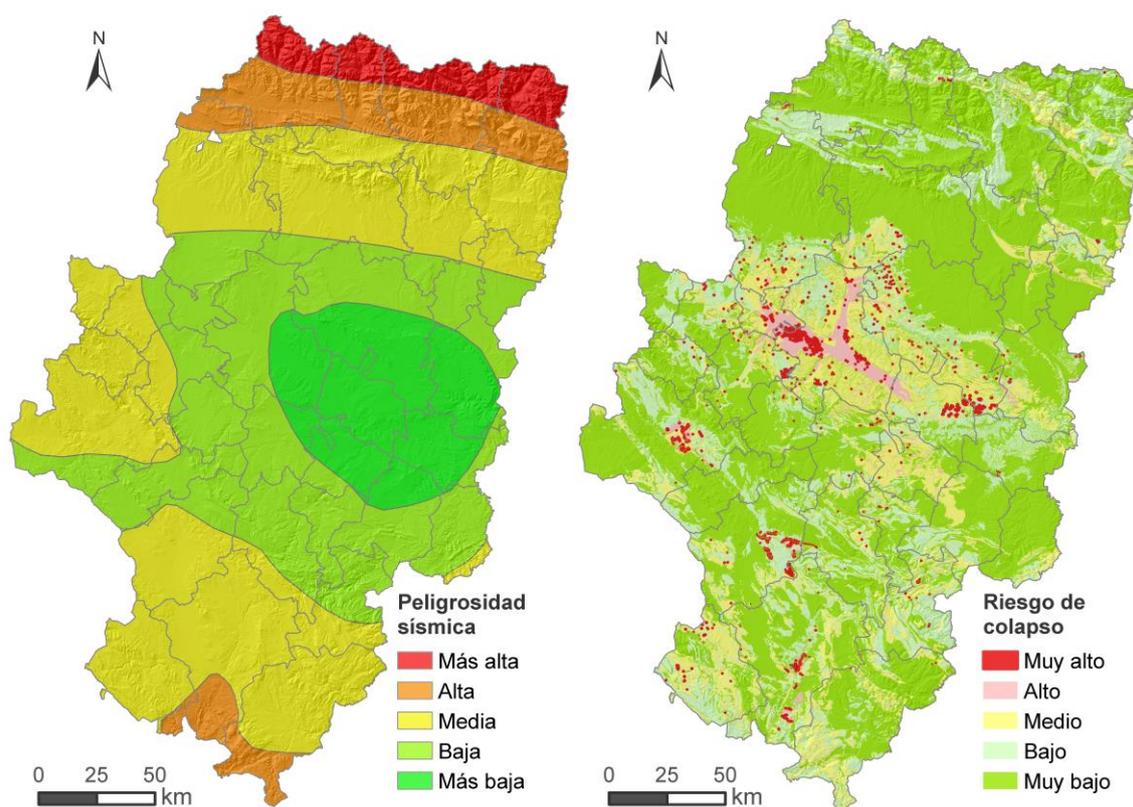


Figura 3.67. (Izquierda): Mapa de peligrosidad sísmica de Aragón. Elaboración propia a partir del mapa de Peligrosidad Sísmica de España (Centro Nacional de Información Geográfica, 2015).

Figura 3.68. (Derecha): Mapa de Susceptibilidad de Colapso en Aragón. Elaboración propia a partir de información suministrada por el Gobierno de Aragón.

Las áreas de mayor actividad sísmica en la Comunidad Autónoma de Aragón se encuentran íntimamente relacionadas con las zonas montañosas de la región. Los valores de peligrosidad sísmica más alta son hallados exclusivamente en el Pirineo Axial, a lo largo de toda la frontera franco-aragonesa, mientras que la peligrosidad alta es propia de la Depresión Intrapirenaica y del área más meridional de la Sierra de Gúdar-Javalambre.

Los valores de peligrosidad sísmica media se localizan en el resto del Sistema Ibérico tanto turolense como zaragozano, exceptuando la comarca del Campo de Daroca y el norte del Maestrazgo. Las Sierras Exteriores Pirenaicas y Somontano Oscense comparten categoría de peligrosidad sísmica media. El resto del territorio ha sido catalogado como de peligrosidad sísmica baja o muy baja, coincidiendo esta última categoría con una extensión ubicada entre la Ribera Baja de Ebro, los Monegros, el Bajo Cinca y el Bajo Aragón.

Los colapsos, por su parte, son deformaciones casi verticales o asentamientos de los materiales de la superficie terrestre, que con frecuencia da lugar a hoyos generalmente circulares denominados dolinas, aunque pueden aparecer con otros patrones más irregulares o lineales (Servicios y Proyectos del Ebro S.A., 2011). Aunque existen diversos mecanismos capaces de generar estas deformaciones del terreno, los colapsos estudiados en esta tesis están asociados a la disolución de terrenos solubles, como calizas, yesos y sales. El principal agente involucrado en el desarrollo de los procesos kársticos es el agua, que se combina con la roca o partes de esta para dar lugar a una solución o conjunto de solutos. Los minerales que conforman las rocas carbonatadas son muy poco solubles en agua pura, siendo el CO<sub>2</sub> contenido en el agua natural el que propulsa la disolución de estos minerales. Las aguas más frías poseen una mayor capacidad de disolver CO<sub>2</sub>, por lo que serán más propicias a iniciar procesos kársticos. Por su parte, los minerales que forman las rocas evaporíticas son mucho más solubles, por lo que los procesos kársticos en estas formaciones presentarán tasas de generación y desarrollo mucho mayores.

La interacción de los procesos kársticos con el hombre y las actividades humanas puede ser responsable de importantes daños económicos e incluso producir pérdidas de vidas humanas. Es, por tanto, indispensable, determinar el riesgo de que se produzca un fenómeno de estas características en el terreno en el que se va a implantar una actividad económica, mucho más en actividades relacionadas con la extracción minera, ya que se movilizan grandes cantidades de roca, alterando las condiciones naturales del medio que aumentan la exposición de las formaciones rocosas a la actividad del agua. La utilización de explosivos para el avance del frente minero también puede inducir a una mayor fracturación del macizo rocoso, incrementando la permeabilidad del mismo y la capacidad penetrativa del agua, y por tanto, su capacidad de disolución.

Por otra parte, la presencia de balsas en terrenos propicios para el desarrollo de fenómenos kársticos puede resultar muy peligroso si estas no se encuentran perfectamente impermeabilizadas. Pequeñas fugas del líquido almacenado podrán disolver las formaciones sobre las que se asienta la balsa, fomentando el desarrollo de este tipo de fenómenos. Además, los modelados kársticos se caracterizan por poseer unas redes de drenaje

subterráneas muy complejas. Si los materiales albergados en las balsas alcanzaran estas redes, las fugas podrían propagar los contaminantes a zonas más o menos amplias.

En la elaboración del Mapa de Susceptibilidad de Colapso en Aragón (Servicios y Proyectos del Ebro S.A., 2011), fueron empleados dos criterios básicos. Por un lado, los materiales geológicos presentes en el territorio fueron divididos en cuatro grupos en función de su litología, diferenciando los materiales según su mayor o menor solubilidad. Por otro lado, los autores del mapa tuvieron en consideración la facilidad de circulación del agua en cada sector del territorio. Ambos criterios fueron cruzados generando una matriz, a partir de la cual se establecieron cinco niveles de susceptibilidad (Figura 3.68.).

La mayor extensión de zonas con riesgo de colapso alto o muy alto dentro de la Comunidad Autónoma aragonesa coincide con los materiales evaporíticos que configuran el valle del Ebro aguas arriba y aguas abajo de la ciudad de Zaragoza. Las zonas de riesgo muy alto se corresponden con localizaciones en las que hay evidencias de que en el pasado se han producido eventos de este tipo, pudiéndose observar en la cartografía una elevada intensidad de generación de formas asociadas al colapso cerca del río Ebro aguas arriba de la capital aragonesa, aunque no son infrecuentes en todo el resto de su extensión, especialmente, en la comarca de la Ribera Baja del Ebro. La presencia de rocas evaporíticas en todo el resto de la cuenca terciaria del Ebro implica la asignación a esta zona de un riesgo de colapso medio a muy alto. Otra zona problemática por el elevado riesgo de que se produzcan fenómenos kársticos es el entorno de la ciudad de Calatayud, donde tanto en el pasado como en la actualidad han tenido que afrontar problemas derivados de la disolución de los materiales situados en el subsuelo.

Fuera de las áreas dominadas por rocas evaporíticas, las serranías calcáreas de la Ibérica también van a presentar una fuerte predisposición a sufrir fenómenos kársticos, al conjugarse rocas solubles con aguas esencialmente frías durante gran parte del año. No obstante, los procesos de disolución en rocas carbonatadas son mucho más lentos que los observables en otro tipo de rocas solubles, por lo que la peligrosidad se verá reducida. En cualquier caso, es posible encontrar zonas de riesgo muy alto en áreas como las montañas situadas en el margen oriental de la comarca del Jiloca, en el entorno de la ciudad de Teruel

y en varios puntos de la Sierra de Albarracín. Por el contrario, las fosas y valles situados en el seno de la Cordillera Ibérica presentan riesgos de colapso bajos o muy bajos.

La provincia de Huesca muestra un riesgo de colapso menor en gran parte de su extensión, a excepción de diversas zonaciones en su margen oriental, localizadas tanto en la zona pirenaica como en la de somontano.

Los deslizamientos, en sentido genérico, son un proceso geológico consistente en la movilización de roca, suelos o derrubios situados en laderas o escarpes, hacia el exterior de las mismas y en sentido descendente, por acción de la fuerza de la gravedad. Al ser fenómenos complejos, en la generación y propagación de los movimientos en masa intervienen un amplio número de factores, entre los que se incluye el tipo de material que configura las pendientes y sus características geológicas (litología, composición, mineralogía y textura), la energía del relieve, que estará relacionada con la pendiente de la ladera o el régimen hidrogeológico. Los principales factores desencadenantes de este tipo de movimientos son las lluvias intensas y la fusión rápida de la nieve acumulada, así como los eventos sísmicos. La actividad humana también puede influir en la desestabilización de las laderas e incluso, servir como catalizador de los movimientos en masa.

La actividad minera tiene también un efecto importante en la generación y propagación de deslizamientos. Por un lado, las galerías subterráneas abandonadas cuando pierden su capacidad portante pueden generar colapsos que actúan como desencadenantes de este tipo de fenómenos geológicos. Por su parte, las voladuras empleadas para avanzar en el frente minero, producen vibraciones que pueden actuar como catalizadoras de movimientos de masa y disminuyen la estabilidad (Gutiérrez Elorza, 2008). El aumento de la permeabilidad de la masa rocosa, asociada con la fracturación de la roca por las explosiones utilizadas en minería también incrementa la inestabilidad de los macizos rocosos.

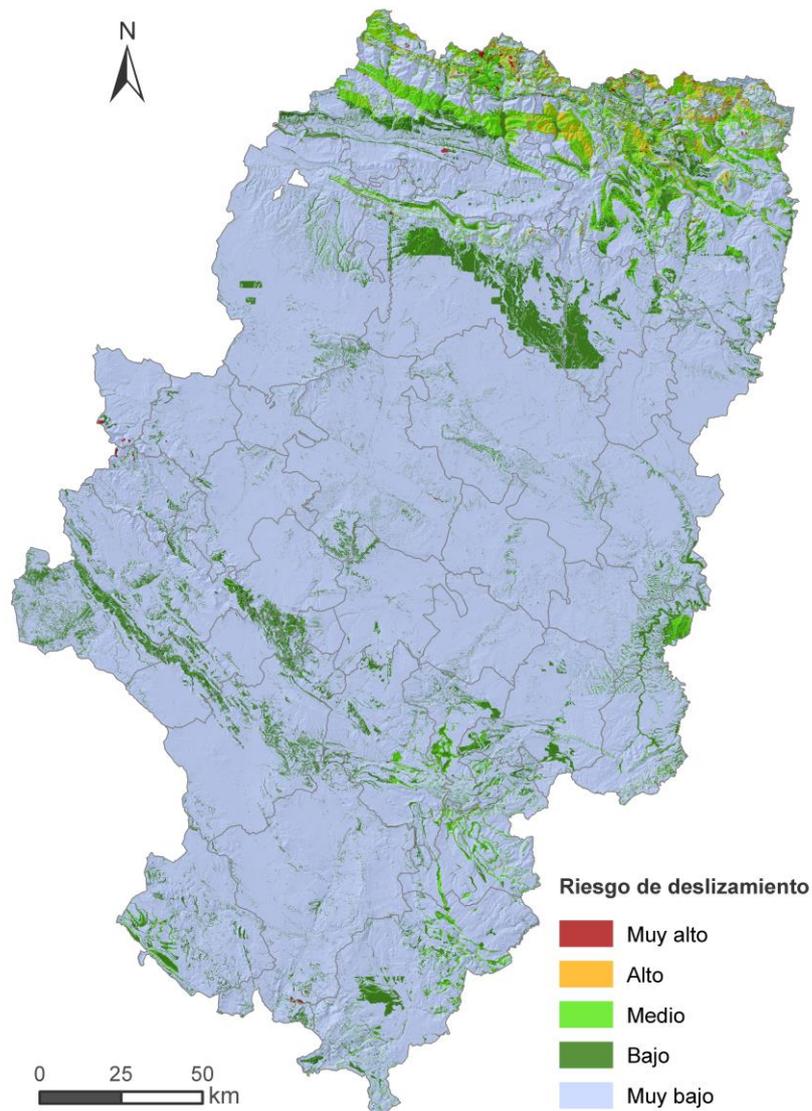


Figura 3.69. Mapa de Susceptibilidad de Movimientos de Ladera. Elaboración propia a partir de información del Mapa de Susceptibilidad de Movimientos de Ladera (Servicios y Proyectos del Ebro S.A., 2011).

Los movimientos en masa poseen una gran capacidad destructiva, tanto por la cantidad de material movilizado como por la velocidad que este material puede llegar a alcanzar, y son capaces de producir importantes daños en las infraestructuras y construcciones humanas, e incluso provocar pérdidas humanas. La interacción de los movimientos en masa con los seres humanos o sus actividades económicas causa anualmente grandes pérdidas económicas y de vidas humanas. La peligrosidad de los movimientos de ladera está relacionada con la cantidad de masa movilizada y la velocidad de esta. Cruden y Varnes (1996) propusieron una clasificación que vincula la velocidad de la masa en movimiento con los daños que pudieran provocar, de modo que, cuanto más rápido sea el movimiento,

mayor será la capacidad destructiva para las personas y sus bienes. En cualquier caso, los movimientos lentos, si bien no suponen un riesgo extremo para la vida de las personas, sí que pueden generar pérdidas económicas importantes.

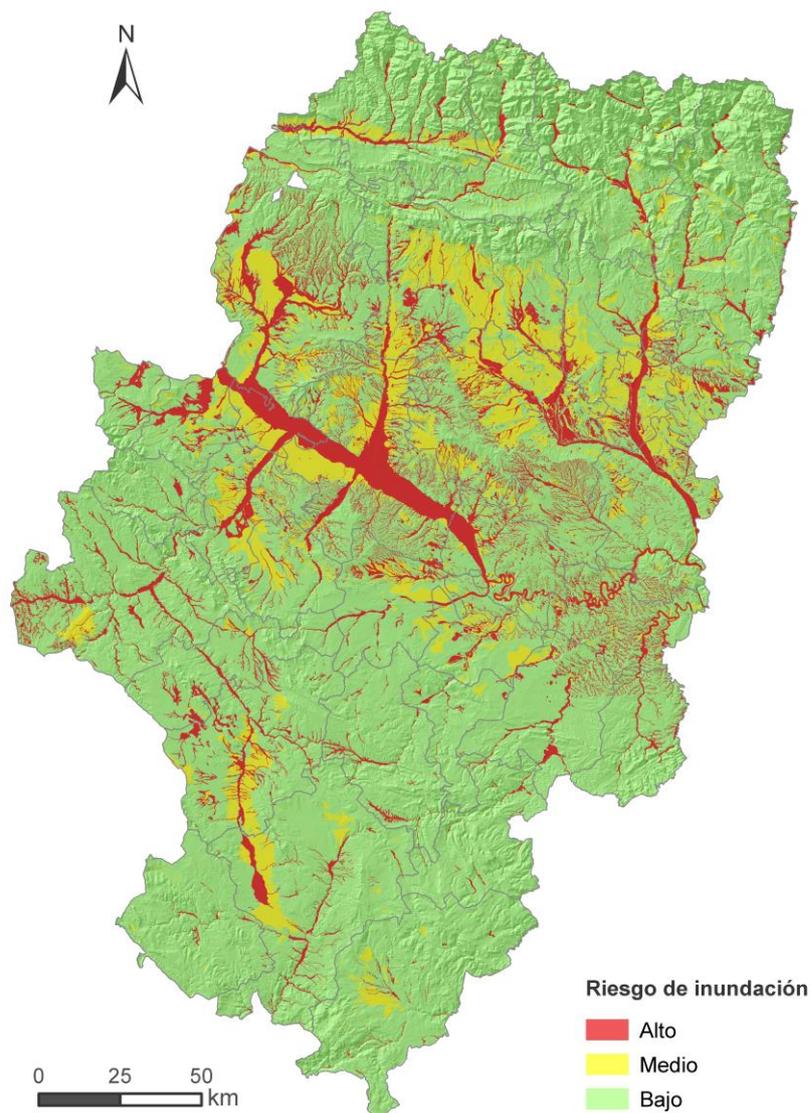
En el Mapa de Susceptibilidad de Movimientos de Ladera (Servicios y Proyectos del Ebro S.A., 2011), la fuente básica empleada en este apartado, la geografía aragonesa es dividida en cinco categorías diferentes en función del riesgo de que en esa área se produzca un evento de estas características (Figura 3.69). Para ello, los autores analizaron las propiedades de comportamiento del material, es decir, distinguieron entre roca desnuda y suelo, el grado de permeabilidad de la masa rocosa o del suelo que cubre cada porción del territorio (basada en el nivel de fracturación del macizo rocoso), la intensidad de precipitación para el caso de los suelos y las pendientes del terreno en cada punto.

La cartografía referente al riesgo de deslizamiento en el territorio aragonés demuestra que gran parte de la comunidad está situada en zonas muy estables donde la peligrosidad es muy baja. Tan solo algunas zonas montañosas se encuentran catalogadas fuera de este nivel de riesgo mínimo. Así, la mayor parte de las zonas montañosas con pendientes moderadas a altas localizadas en la Cordillera Ibérica y las Sierras Exteriores muestran un riesgo de deslizamiento un nivel o dos niveles por encima del mínimo. La situación más problemática se localiza a lo largo de la cordillera pirenaica, donde en gran parte de su territorio existen zonas clasificadas de riesgo medio, alto y muy alto. Coinciden con bastante precisión con las alineaciones montañosas de más pendiente, y son especialmente continuas en su zona occidental.

No obstante, existen zonas de riesgo muy alto, es decir, de pendientes elevadas o, más importante, lugares donde se tiene constancia de que este tipo de proceso ha ocurrido ya en algún momento de su historia, en muchos puntos de las Sierras Exteriores oscenses, en las proximidades del Moncayo, en algunas zonas de la Ibérica turolense, especialmente en las localidades de Villed y Cascante del Río, localizadas al sur de la ciudad de Teruel, e, incluso, en los taludes que delimitan la llanura de inundación del río Ebro, en términos municipales como los de Alfajarín o Villafranca de Ebro.

Por otro lado, se denomina inundación a la anegación temporal de terrenos que normalmente se encuentran secos, debido a una aportación repentina e inusual de cantidades de agua superior a las que son habituales en una determinada zona. Por tanto, se definirá el riesgo de inundación como la probabilidad de que un terreno que habitualmente no esté anegado sea cubierto temporalmente por una capa de agua (Servicios y Proyectos del Ebro S.A., 2011). Keller y Blodgett (2004) distinguen dos tipos de inundaciones según el lugar en el que ocurren. Por un lado mencionan las *inundaciones de cabecera*, que suceden en la parte alta de la cuenca de drenaje y se producen por lluvias intensas de corta duración en zonas relativamente pequeñas, más comunes en ambientes áridos y semiáridos o en áreas de topografía abrupta. Las *inundaciones de valle* son mucho más espectaculares al cubrir amplias zonas. Se generan por tormentas de larga duración o por el deshielo brusco, que saturan el suelo y aumentan la escorrentía. Las anegaciones periódicas de la llanura de inundación del río Ebro son un buen ejemplo de este tipo de eventos.

Según datos de Protección Civil, las inundaciones constituyen el fenómeno natural con mayor impacto económico y social en España, y Aragón no es una excepción. Los peligros asociados a este tipo de procesos están relacionados con la fuerza del agua y de los elementos que transporta durante las crecidas, que pueden provocar enormes daños a las propiedades y a la vida de las personas. Estructuras mineras, maquinaria y edificios auxiliares podrían verse gravemente afectados en el caso de que las inundaciones anegaran los terrenos donde se desarrolla la actividad extractiva, así como los trabajadores que en ellos se encuentren. También es importante considerar la posibilidad de que la fuerza del agua destruya elementos como escombreras y, especialmente, balsas que liberen material almacenado peligroso o altamente contaminante.



*Figura 3.70. Mapa de riesgo por inundación. Elaboración propia a partir de la información contenida en el mapa ofrecido por el Gobierno de Aragón.*

En la memoria asociada al mapa en el que se analiza el riesgo por inundación (Servicios y Proyectos del Ebro S.A., 2011), se explica que este tipo de riesgo vendrá determinado por una combinación de factores, entre los que incluyen la morfología del terreno, las características de los materiales que lo forman, la proximidad a la red hidrográfica y la climatología. La metodología principal utilizada en este se basa en criterios geomorfológicos, aunque los autores incluyeron también modelizaciones hidrológicas del terreno, así como análisis referentes a inundaciones históricas de las que se tiene registro.

El riesgo de inundación más alto estará asociado a formaciones geomorfológicas situadas en el propio cauce de los cursos fluviales o en sus proximidades y se corresponden con

sedimentos del sistema fluvial de edades recientes (Figura 3.70.). Entre las formaciones geomorfológicas incluidas en la categoría de susceptibilidad media se encuentran entidades relacionadas también con los flujos de agua, si bien su datación geológica es menos reciente y su proximidad al curso fluvial es menor. Según los técnicos encargados de realizar el informe sobre el mapa de Susceptibilidad de Riesgo por Inundación, más del 11% del territorio de la Comunidad Autónoma de Aragón se encuentra localizado en áreas con un riesgo alto de sufrir inundaciones periódicas. De forma obvia, las zonas de mayor susceptibilidad se corresponderán con áreas llanas localizadas en las proximidades de los cursos fluviales más importantes. Las llanuras de inundación de la Ribera Media y Alta del Ebro son las zonas más extensas catalogadas con un riesgo elevado de anegación. Dentro de la provincia de Huesca, una zona fundamentalmente problemática en cuanto a la posibilidad de sufrir este tipo de episodios será la llanura de inundación del río Cinca y de sus afluentes Flumen y Alcanadre, especialmente en el área de confluencia de estos dos últimos. En Teruel, será la fosa del Jiloca la que presente un mayor riesgo de inundación, así como las llanuras de las comarcas del Bajo Aragón y el Bajo Martín, y el cauce del río Turia y sus antecesores, Guadalaviar y Alfambra. Una zona especialmente conflictiva del territorio turolense se halla en la confluencia del río Guadalupe con su afluente Bergantes, aguas arriba del embalse de Calanda.

Por otro lado, cabe destacar que la mayor parte del territorio aragonés, más del 77% según los autores, se engloba dentro de la categoría de riesgo más bajo, coincidiendo con las áreas más alejadas de los cursos fluviales.

En lo que respecta a las lluvias torrenciales, es decir, aquellas que aportan una gran cantidad de agua en breves periodos de tiempo, estas pueden suponer un peligro para las actividades mineras e incluso ser el origen de problemas graves de contaminación. La estabilidad de las escombreras en las que se almacenan los subproductos de las labores mineras se puede ver afectada por este tipo de precipitaciones, dando lugar a deslizamientos del material que pueden, incluso, poner en peligro vidas humanas y maquinaria. Además, las precipitaciones repentinas tienen la capacidad de colmatar las balsas en las que se almacenan restos del proceso minero y soluciones ácidas

contaminantes, pudiendo provocar que se desborden, o incluso que el peso del agua induzca fenómenos de deslizamiento en el dique de contención (Oyarzun et al., 2011).

Una buena forma de determinar la probabilidad de que ocurra una tormenta de elevada magnitud en un punto concreto del territorio es observar los registros del volumen de precipitación máxima caída en 24 horas, puesto que los procesos naturales tienden a repetirse en las mismas zonas con unos periodos de retorno relativamente estables. Esto no implica que no se puedan producir tormentas muy virulentas en áreas en las que los registros no son tan elevados, aunque, *a priori*, el riesgo será menor. Los datos disponibles para la C.A. de Aragón, visibles en la Figura 3.71, se corresponden con el periodo de tiempo comprendido entre 1970 y 2000.

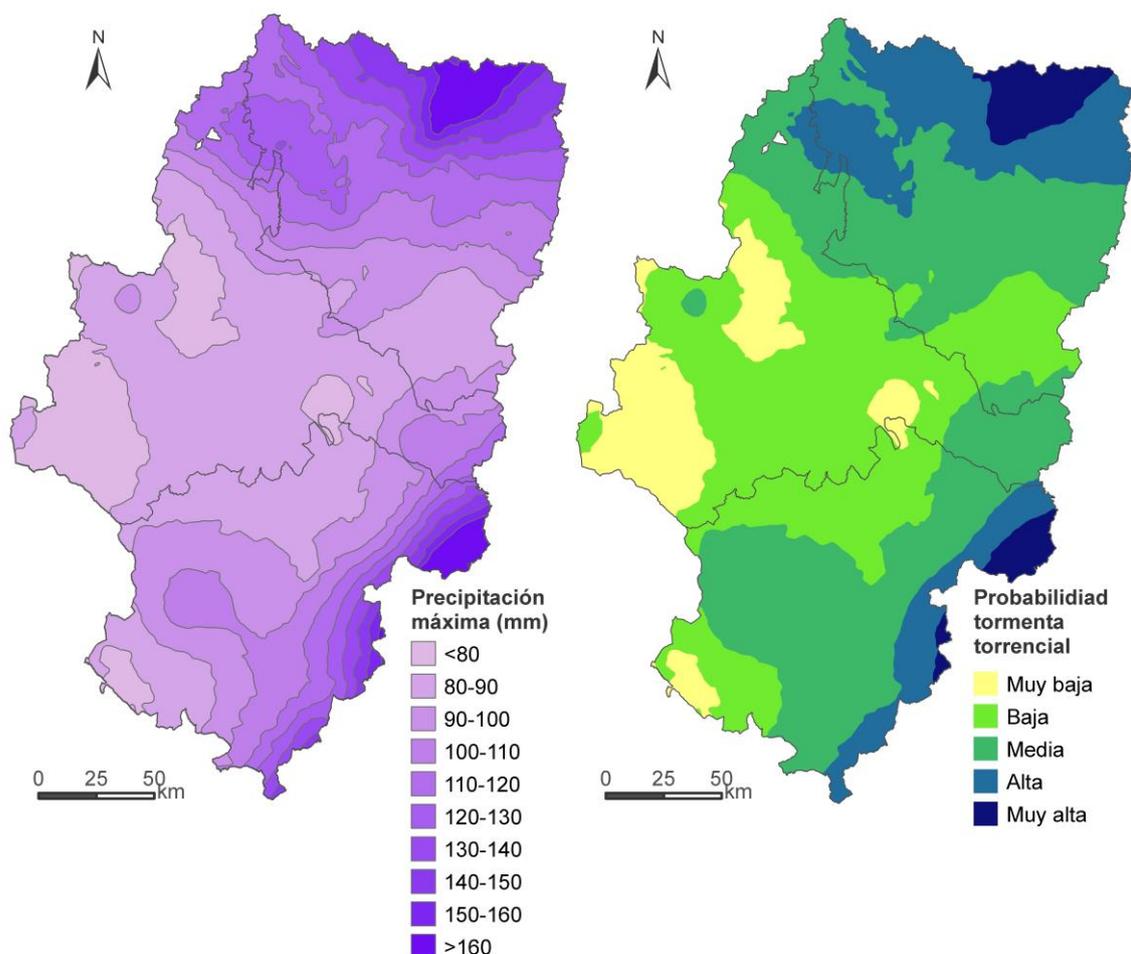


Figura 3.71. (Izquierda): Precipitación máxima registrada en 24 horas. Elaboración propia a partir de los datos contenidos en el Atlas Climático de Aragón (Martín et al., 2007).

Figura 3.72. (Derecha): Riesgo por lluvias torrenciales en Aragón. Elaboración propia a partir de los datos contenidos en el Atlas Climático de Aragón (Martín et al., 2007).

Este mapa indica que prácticamente la totalidad del territorio aragonés está expuesto a sufrir tormentas fuertes, ya que en más del 85% de la superficie aragonesa se han registrado precipitaciones mayores a los 80 mm en un solo día. Los volúmenes de precipitación más elevados registrados en 24 horas, con valores superiores a los 160 mm, se han alcanzado en lugares elevados situados en el margen oriental de la comunidad, concretamente, en los Puertos de Beceite y en los picos de los Pirineos próximos a Cataluña. Estos valores máximos se van reduciendo a medida que desciende la elevación desde los Pirineos hasta la depresión del Ebro, así como desde la zona oriental hacia el oeste, lo que muestra el influjo de la elevación y del Mar Mediterráneo en las precipitaciones tormentosas. Algo similar ocurre en el sur de la comunidad, donde es todavía más marcada la influencia mediterránea. No obstante, los registros de precipitación máxima en un día siguen siendo elevados en las altiplanicies Ibéricas turolenses, resultado de la formación de fenómenos convectivos.

A partir de los datos de volumen de precipitación máxima en un día se establecieron, para esta tesis, diferentes categorías que comparan la probabilidad de que una tormenta torrencial ocurra en cada punto del territorio aragonés (Figura 3.72.).

El último de los factores relacionados con los riesgos geológicos y climáticos analizados, el viento, es un elemento meteorológico de gran relevancia en el territorio aragonés ya que, como se afirma en el Atlas Climático de Aragón, este territorio tiene una rica variedad de flujos ventosos que, tanto por la frecuencia como por la intensidad con la que soplan, imprimen unas características particulares en el clima (Martín et al., 2007). La dirección e intensidad de los vientos aragoneses varía de observatorio a observatorio y, en la mayoría de los casos, guarda una importante relación con la topografía del territorio.

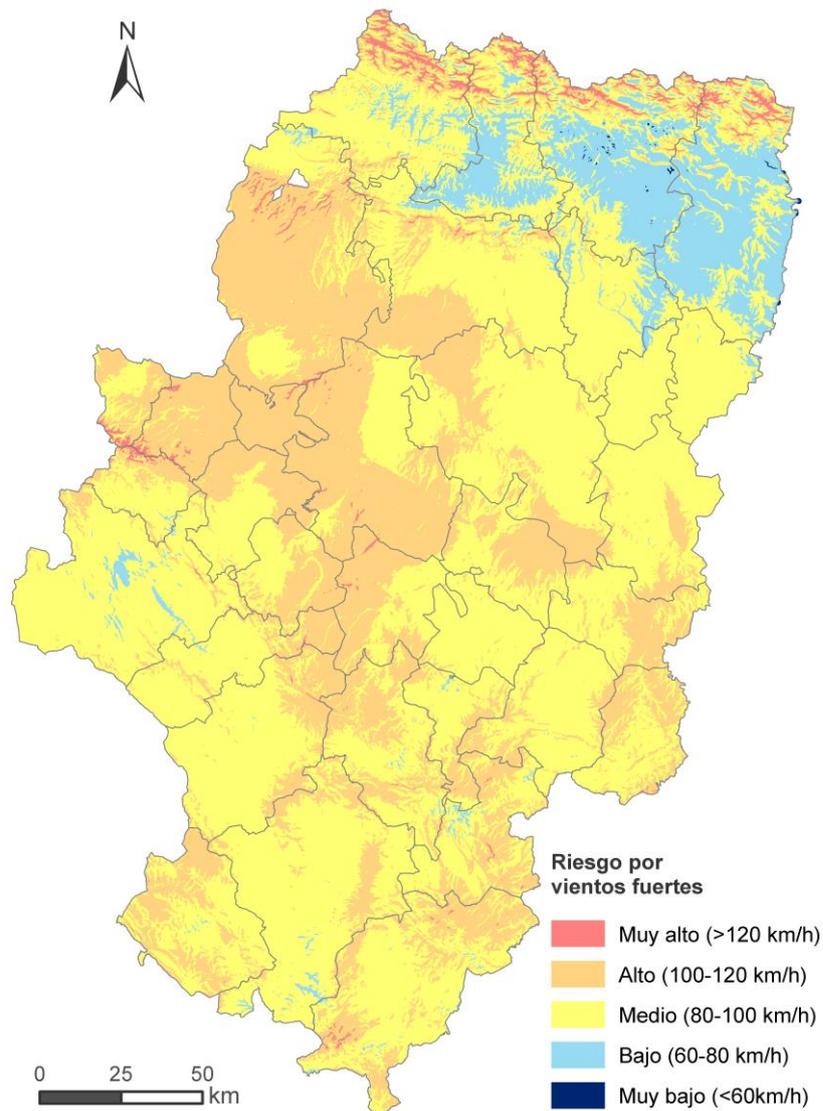


Figura 3.73. Susceptibilidad de Vientos Fuertes. Elaboración propia a partir del mapa de Susceptibilidad de Vientos Fuertes (Servicios y Proyectos del Ebro S.A., 2011).

En relación con el tema tratado, el viento interfiere con las labores mineras de forma muy destacable y su efecto se ve amplificado por el hecho de que estos trabajos suelen realizarse en roca seca, sin posibilidad de humedecerla para evitar la formación de polvo. Por una parte, y aunque su efecto sea poco relevante, los vientos fuertes pueden llegar a desestabilizar escombreras poco compactadas y cohesionadas. Sin embargo, un efecto mucho más importante será el transporte de partículas minerales procedentes de las escombreras y balsas o del propio frente de extracción. La capacidad del viento para transportar partículas va a depender de diversos factores físicos que incluyen tanto propiedades de las propias partículas transportadas (forma, tamaño, etc.) como del viento,

principalmente la velocidad. De forma muy simple, se puede concluir que el viento será capaz de transportar en su seno una mayor cantidad de partículas cuanto mayor sea su velocidad.

El mapa de Susceptibilidad de Vientos Fuertes (Servicios y Proyectos del Ebro S.A., 2011) es la fuente básica empleada en este indicador (Figura 3.73.). Este mapa subdivide el territorio según la susceptibilidad de sufrir rachas de vientos muy fuertes para un periodo de retorno de 2 años. Para ello, sus autores emplearon información derivada de diversas fuentes, como datos procedentes de estaciones meteorológicas ubicadas en el territorio aragonés, información sobre la elevación y rugosidad del territorio y apuntes procedentes del Atlas Eólico de España.

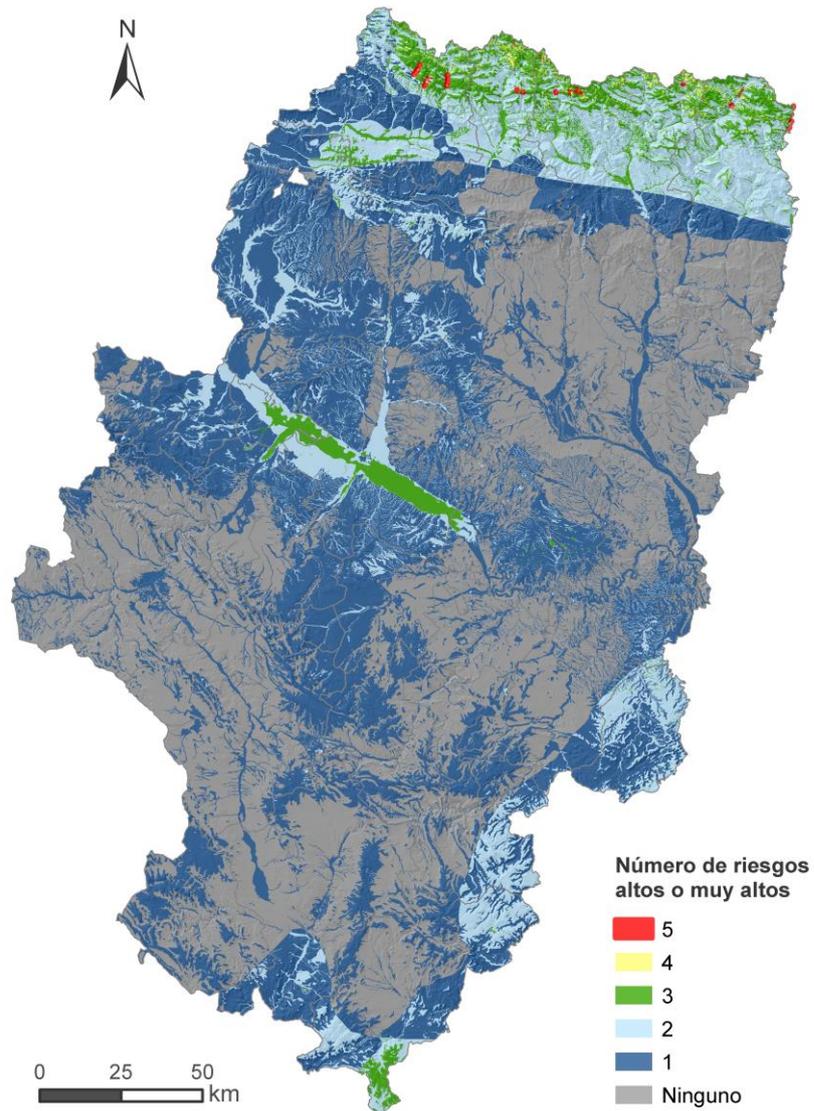
La mayor parte de la Comunidad Autónoma de Aragón se localiza en las áreas catalogadas como de susceptibilidad media y alta, es decir, en la mayor parte del territorio se podrán alcanzar rachas de viento de entre 80 y 120 km/h con una frecuencia relativamente alta. Dentro de estas dos categorías, en la Ribera del Ebro, especialmente en su zona alta y media, las áreas más llanas de las Cinco Villas, la Hoya de Huesca y de los Campos de Belchite y Cariñena, son las que presentan probabilidades de vientos más fuertes. También en esta categoría (con rachas probables de entre 100 y 120 km/h) se encuentran englobadas las serranías más elevadas de la Ibérica turolense.

Las áreas clasificadas dentro de la categoría de riesgo muy alto por vientos fuertes, donde es muy probable que se registren rachas superiores a los 120 km/h, se localizan en las zonas más elevadas y, por tanto, expuestas, de la comunidad, concretamente en el Pirineo Axial y en la Sierra del Moncayo.

Para concluir el apartado relacionado con los riesgos geológicos y climáticos, una vez analizado como estos se distribuyen en el territorio aragonés, conviene explicar que existen ciertos vínculos entre los diferentes riesgos naturales (Keller y Blodgett, 2004). Los procesos peligrosos están conectados de muchas maneras. Por ejemplo, las lluvias torrenciales pueden provocar inundaciones, que a su vez socaban la estabilidad de las laderas produciendo deslizamientos en masa o culminar procesos de disolución de rocas solubles causando el colapso de parte del suelo. Pero también, los desprendimientos de ladera

pueden estar inducidos por movimientos sísmicos, existiendo la posibilidad que el material desplazado obstruya el drenaje efectivo de una cuenca hídrica, lo que favorecerá la anegación de los terrenos situados aguas arriba.

Partiendo del supuesto de que los riesgos naturales se relacionan entre sí, se ha realizado una cartografía que muestra el número de riesgos calificados como de peligrosidad alta o muy alta en cada punto del territorio. En el mapa resultante (Figura 3.74.) puede observarse una clara coincidencia de áreas con probabilidad alta de que se produzcan varios de los tipos de riesgos estudiados, concentrándose estas zonas en el valle del Ebro y en los Pirineos. Tres son los tipos de riesgos calificados con una peligrosidad elevada en el centro del valle del Ebro, tanto aguas arriba como aguas abajo de la ciudad de Zaragoza. La posibilidad de sufrir eventos relacionados con vientos fuertes, inundaciones y fenómenos de colapso no es desdeñable en esta localización. La zona pirenaica, por su parte, será la que sufra una mayor posibilidad de que ocurran riesgos geológicos de diferente naturaleza, existiendo pequeñas *teselas* del territorio, generalmente coincidentes con valles entre escarpadas montañas, con hasta 5 tipos de riesgo clasificados como altos o muy altos. Otras áreas más extensas contarán con 4 riesgos y un área todavía más amplia con tres. Prácticamente toda la cordillera presentara riesgo alto en al menos dos categorías de riesgos naturales.



*Figura 3.74. Mapa de síntesis de los riesgos geológicos y climáticos: número de riesgos clasificados como de riesgo alto o muy alto en cada porción del territorio. Elaboración propia.*

Por otra parte, el cambio climático y el calentamiento global podrían tener un efecto negativo aumentando la frecuencia y la magnitud de los eventos catastróficos que de una u otra manera están relacionados con eventos meteorológicos, no solo los directos como las lluvias torrenciales o las tormentas eléctricas, sino también inundaciones, desprendimientos de tierra, sequías o incendios.

### 3.4.2. Características sociales, económicas y ambientales para el estudio de la dimensión *Inserción socioeconómica*

En este segundo apartado se incluirán los factores necesarios para el estudio de la dimensión denominada *Inserción socioeconómica*. En concreto, serán descritas las características demográficas y socioeconómicas de la región, la parcelación del territorio, el reparto de las infraestructuras de transporte y de las redes suministradoras de electricidad y combustible, así como la distribución de las masas boscosas y otros usos del suelo en el territorio aragonés, la presencia de figuras de protección destinadas a la conservación del patrimonio natural y cultural y, finalmente, las características del paisaje.

#### 3.4.2.1. Características demográficas y económicas del territorio aragonés

La distribución de la población en el territorio y las características socioeconómicas del mismo son factores que serán empleados en la formulación de dos indicadores diferentes, los relacionados con el impacto potencial en la economía local y con el nivel de exposición de los núcleos de población. El primero de los indicadores será elaborado con datos relativos a la población y al empleo total y en sus sectores básicos. En las áreas extraurbanas susceptibles de ser beneficiadas de los recursos estudiados en la tesis, los municipios y el número de empleos son pequeños, lo que, como después se verá, establece *a priori* que el impacto potencial sobre las economías sea más alto. Por otro lado, para conocer el grado de exposición de los núcleos de población frente a las perturbaciones derivadas de la actividad minera será necesario conocer la distribución de estos municipios en el territorio.

Si algo caracteriza la demografía aragonesa es la polarización de la población, la amplitud de su medio rural y la elevada despoblación (Figura 3.75.). En 2018 la comunidad contaba con 1.308.728 habitantes (IAEST, 2019) en sus 47.719 km<sup>2</sup>, lo que ofrece una densidad de población de 27,4 hab/km<sup>2</sup>, un valor muy bajo pero asimilable a los de las Comunidades Autónomas españolas del interior (exceptuando la Comunidad de Madrid). A nivel local, más del 71% de los municipios aragoneses presentan densidades inferiores a los 10 hab/km<sup>2</sup> y 134 no llegan a superar los 2 hab/km<sup>2</sup> («Atlas de Aragón», s. f.).

Por otro lado, la población aragonesa tiende a habitar concentrada en núcleos de población, de menor o mayor tamaño. Según datos del año 2017, solo 18.274 personas en toda la región vivían de forma diseminada fuera de estas agrupaciones poblacionales, lo que representaba menos de un 1,5% del total. Este factor, sumado al hecho de que el número de habitantes de la región es muy escaso en comparación con el territorio por el que se distribuye, además de que, como se verá a continuación, gran parte de esta población se encuentra concentrada en la ciudad de Zaragoza, redundando en la existencia de extensas superficies despobladas, o con una población muy dispersa pero concentrada en pequeños núcleos.

Esta forma de distribución de la población en el territorio favorecerá el desarrollo de la actividad minera, puesto que el grado de afectación a las personas residentes será reducido en la mayor parte de los casos debido a la existencia de grandes áreas vacías en el territorio. No en vano, el color violeta, mayoritario en el mapa que muestra la densidad de poblamiento (Figura 3.76.), representa aquellos puntos del territorio en los que no existe ningún núcleo poblado en un radio de 5 kilómetros.

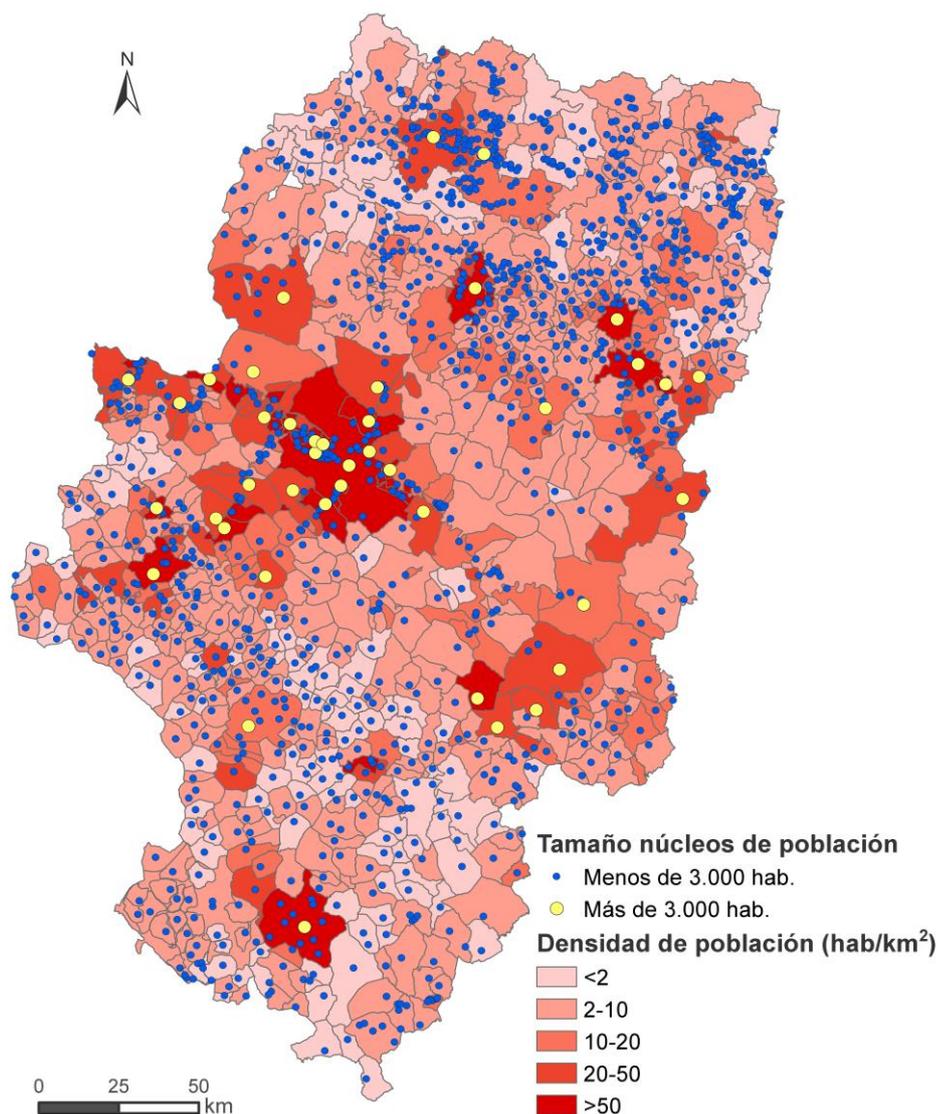


Figura 3.75. Mapa de densidad de población de los municipios aragoneses y distribución de los núcleos poblacionales menores de 3.000 habitantes (año 2018). Elaboración propia a partir de datos del Instituto Aragonés de Estadística (IAEST).

Como se adelantaba en párrafos anteriores, otra característica fundamental de la demografía aragonesa es la polarización de la población y de los servicios. Solamente la ciudad de Zaragoza, con 664.938 habitantes, concentra más del 50% de la población aragonesa. Si se tienen en cuenta las otras dos capitales provinciales, la población total aglutinada en estas tres ciudades ya alcanza el 57% del total.

Esta polarización es también claramente visible en la distribución de los empleos en el territorio (Figura 3.77.). Más de la mitad de las altas en la Seguridad Social se concentran en la Delimitación Comarcal de Zaragoza. A nivel provincial también existe una cierta

polarización en las comarcas en las que se localizan las otras dos capitales. Además de la aglomeración observable a nivel regional y provincial, dentro de muchas de las comarcas que componen la comunidad aragonesa también existe una clara concentración del número de empleos en torno a la cabecera comarcal, especialmente marcado en la Hoya de Huesca y en la Comunidad de Teruel, en las que el número de afiliaciones a la Seguridad Social en las localidades más importantes alcanza casi el 90% del total. En el extremo opuesto se encuentran las Cuencas Mineras, la Ribera Alta del Ebro y el Bajo Martín. De este modo, y sin tener en cuenta otros factores, la apertura de una labor minera en las áreas más despobladas, en las que el empleo es escaso y se encuentra concentrado en unos pocos municipios, tendría un fuerte impacto en la economía local y en la revitalización del territorio, al poseer la capacidad de atraer nueva población y aumentar las posibilidades laborales de la ya residente.

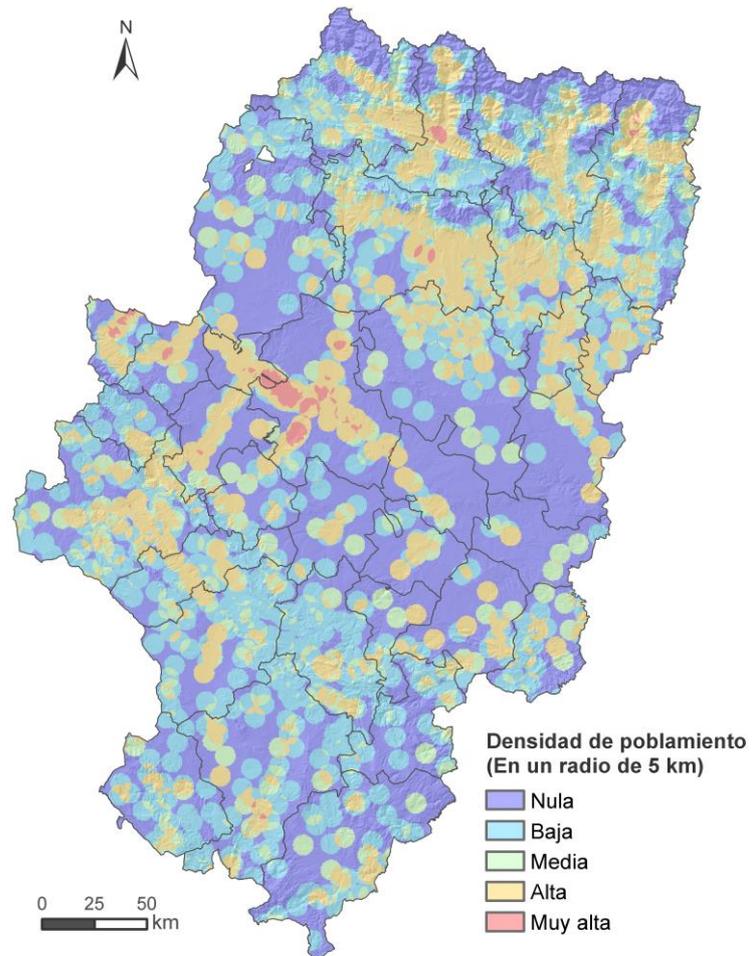


Figura 3.76. Mapa densidad poblamiento del territorio aragonés (año 2018). El radio establecido entorno a los núcleos de población fue fijado en 5 km, valor empleado en el indicador Afectaciones a la población. En la realización se establecieron categorías con un peso diverso en función de la población total residente en la localidad. Elaboración propia.

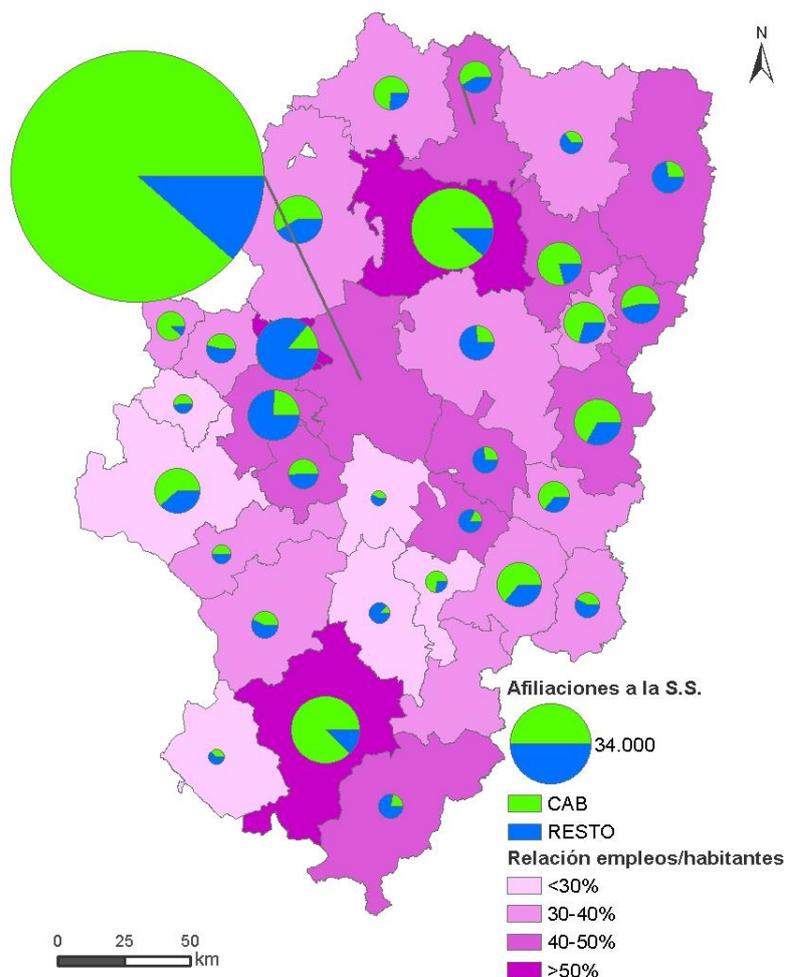
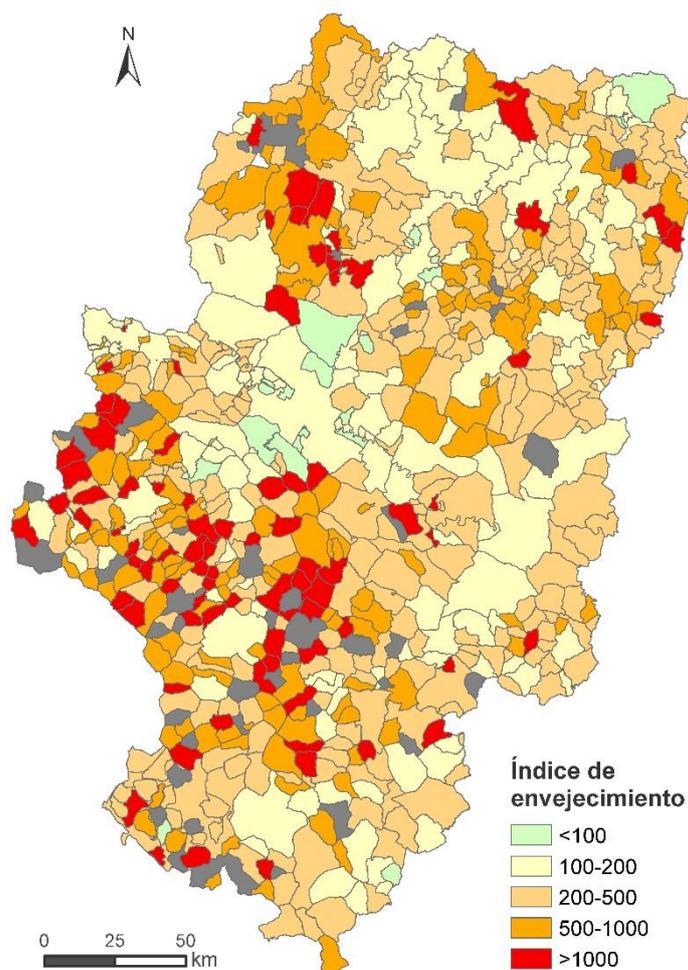


Figura 3.77. Afiliaciones en alta a la Seguridad Social a nivel comarcal y porcentaje de afiliaciones en la cabecera comarcal y en el resto de municipios (año 2018). Número de afiliaciones a la Seguridad Social en función del número de habitantes. Los datos para la capital de la comarca del Maestrazgo, Cantavieja, no se encontraban disponibles en la fuente. Elaboración propia a partir de datos del Instituto Aragonés de Estadística.

No obstante, otro rasgo definitorio de la demografía aragonesa es el envejecimiento de la población, observable en prácticamente todos sus municipios, incluso en las ciudades más pobladas (Figura 3.78.). Los municipios con índices de envejecimiento menores a 100, es decir, en los que la población joven es mayor que la población mayor de 65 años, son escasos en la región y se encuentran concentrados, con algunas excepciones, en el entorno de las ciudades de Zaragoza y Huesca. Por el contrario, la mayoría de los municipios con poblaciones envejecidas se sitúan en la Cordillera Ibérica, en las provincias de Zaragoza y Teruel, donde un número preocupante de municipios no cuentan con ningún habitante menor de 16 años. También en la comarca de las Cinco Villas, en el interior de la provincia de Huesca y en extensas áreas del Pirineo la población presenta un alto grado de envejecimiento.



*Figura 3.78. Índice de envejecimiento por municipio, resultado de la división, en tantos por ciento, de la población mayor de 65 años entre la menor de 16 (año 2018). En numerosos municipios, representados en gris en el mapa y localizados principalmente en el área rural de la Cordillera Ibérica, este índice no puede ser calculado debido a que no existe ningún habitante menor de 16 años. Elaboración propia a partir de datos del Instituto Aragonés de Estadística.*

Si se compara el mapa que representa el índice de envejecimiento a nivel municipal con la densidad de población (Figura 3.75.) se observa una clara correlación entre las áreas menos pobladas y la presencia de una población envejecida. El envejecimiento de las áreas menos densamente pobladas, que además eran las que contaban con un menor número empleos, dificultará la disponibilidad de personas en edad apta para trabajar en las potenciales explotaciones mineras. Es por este motivo por el que, como se analizará en el siguiente capítulo de la tesis, el impacto potencial en la economía local no será máximo en aquellos territorios con un menor número de habitantes y de empleos, sino que deberá ser asignado a aquellas áreas en las que el inicio de una actividad extractiva generadora de empleo suponga un revulsivo en el número de empleos directos, pero que además posea una

estructura socioeconómica capaz de retener los empleos indirectos derivados de la labor minera y que cuenten población susceptible de ser empleada en este tipo de labores.

#### *3.4.2.2. Parcelación del territorio*

La minería, como una gran parte de las actividades económicas ha de ser desarrollada sobre una superficie física real, es decir, sobre un terreno que será propiedad de alguien, bien sea un ente público o un propietario privado. Esto implicará que el empresario interesado en la apertura de una potencial industria extractiva, o en la ampliación de una labor ya en marcha, tendrá que asegurarse la adquisición de los terrenos por los que se extienda el cuerpo mineralizado, y que pueden pertenecer a uno o varios propietarios. Cuanto mayor sea el número de implicados en los procesos de adquisición de las tierras mayor será la dificultad de que las negociaciones sean fructíferas. Engels (2010) señala la importancia de determinar la propiedad de la tierra, los derechos y límites, como estrategia de planificación y apertura de una explotación minera (Oyarzun et al., 2011).

El Centro para el desarrollo minero sostenible del British Geological Survey (Minerals UK, 2017) incluye incluso una tercera dimensión en la definición de la reservas minerales y su distinción de los recursos (que fue descrita en el primer bloque de este capítulo) relacionada con el acceso a los cuerpos mineralizados, ya que advierten que la posibilidad de beneficio de los yacimientos quedará supeditada a la adquisición de las tierras donde se ubican dichos yacimientos.

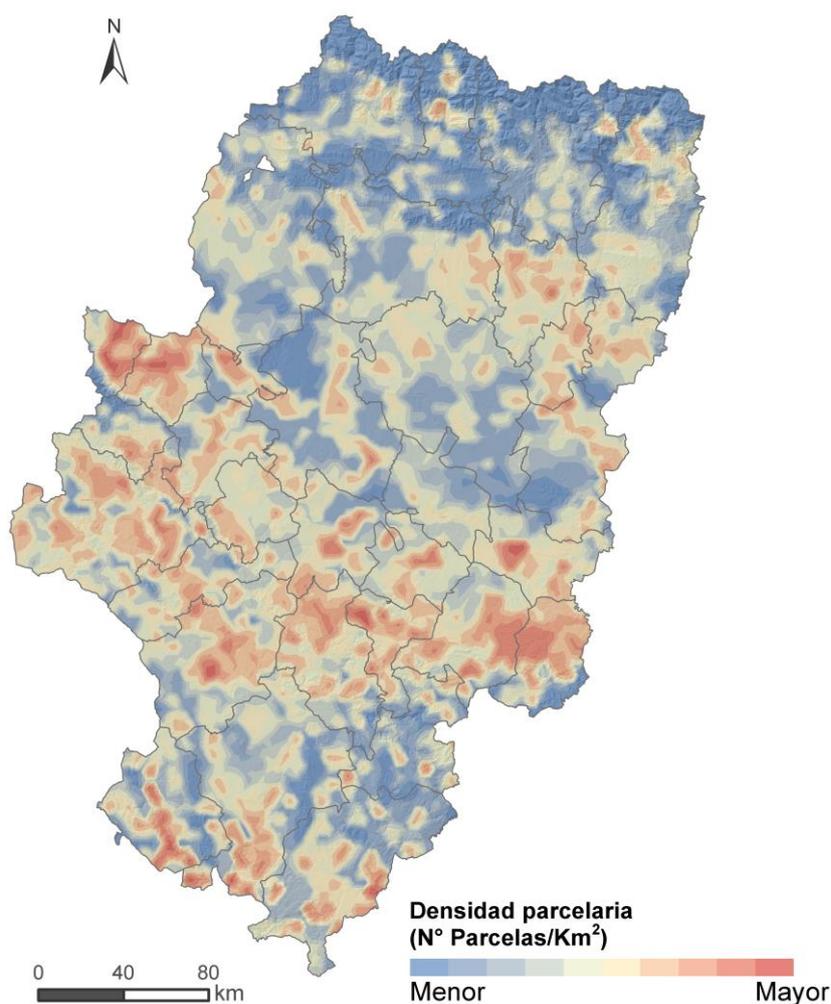


Figura 3.79. Mapa de densidad parcelaria de la Comunidad Autónoma Aragonesa (número de parcelas por km<sup>2</sup>). Elaboración propia.

Por otro lado, las trabas legales derivadas de la extensión del recurso minero por varias entidades administrativas de diversa categoría (municipios, provincias, regiones o, incluso países), pueden ralentizar los trámites de adquisición del terreno y, por lo tanto, el comienzo de una nueva actividad minera. Además este proceso puede conllevar la expropiación forzosa de los terrenos a sus propietarios, poniendo en riesgo la estabilidad social del área en el que se integra el yacimiento, así como las formas de subsistencia tradicionales de las comunidades asentadas en el entorno.

En la práctica, resulta difícil obtener información sobre la propiedad de las diferentes parcelas que configuran el territorio, mucho más si la escala con la que se trabaja es la regional. Sin embargo, sí que ha sido posible encontrar información referente a la parcelación del territorio a una escala local. Estos datos proceden tanto en la Infraestructura

de Datos Espaciales de Aragón, para los municipios pertenecientes a esta región, como en la Sede Electrónica del Catastro para las localidades adyacentes a la frontera aragonesa, pero pertenecientes a otras comunidades autónomas.

El mapa que representa la densidad parcelaria del terreno (Figura 3.79.) muestra, en términos generales, unos valores más elevados al norte de la provincia de Teruel y al sur de la de Zaragoza, en áreas con un gran desarrollo agrícola. Por el contrario, la fragmentación del territorio en parcelas es mínima en zonas de montaña de los Pirineos, así como en las sierras más elevadas de la Cordillera Ibérica turolense (Maestrazgo, Gúdar, Puertos de Beceite y sectores de la Sierra de Albarracín). La densidad parcelaria es también baja en zonas de los Monegros, el Bajo Cinca y de la D.C. de Zaragoza.

#### *3.4.2.3. Redes de transporte de personas y mercancías, de electricidad y de combustible*

En la actualidad, prácticamente la totalidad de las actividades económicas emprendidas por el hombre en el mundo desarrollado están condicionadas a la posibilidad de acceso a servicios como el transporte, el combustible, la electricidad o el agua. La minería moderna no es una excepción. La fuerza bruta de seres humanos y animales que alguna vez fue el motor para el desarrollo de las actividades mineras ha sido actualmente, al menos en parte, sustituida por una compleja red de maquinaria pesada y herramientas que requieren de combustible o electricidad para su funcionamiento.

Por otra parte, el mineral extraído pocas veces es empleado en el lugar donde se recolecta. El producto final suele ser comercializado en mercados lejanos, por lo que será necesaria una buena red de transporte que permita tanto la exportación del producto minero, como el acceso del personal y la maquinaria al yacimiento. En ocasiones, el desarrollo de labores mineras en un territorio ha contribuido a la construcción y mejora de infraestructuras de transporte. Sirva de ejemplo la creación de la vía férrea inaugurada a principios del Siglo XX destinada al transporte de lignito desde Utrillas, en las Cuencas Mineras de Teruel, hasta la capital aragonesa (Peris Torner, 2012). Sin embargo, estas infraestructuras son costosas y pueden repercutir en el precio del producto, en el margen de beneficio de la empresa minera y sumar nuevos impactos ambientales a las ya numerosas afecciones directas derivadas de la minería.

A diferencia de lo que sucede en otras actividades económicas, en las que el proceso de ubicación está ligado al acceso a las diversas redes suministradoras de servicios, el valor localizado de los proyectos mineros condiciona la ubicación de la explotación en el lugar donde se localiza el enriquecimiento mineral que quiere ser explotado. En el caso de minerales de elevado valor estratégico o económico, el coste que supone la construcción de las infraestructuras necesarias para la actividad minera podría ser compensado por el propio interés del elemento a explotar, sin embargo, cuando se trata de yacimientos minerales comunes o de escasa valía económica, la existencia de una red infraestructural adecuada podría hacer que los inversores se decantaran por una determinada ubicación en detrimento de otras más aisladas en términos de accesibilidad o servicios.

En el análisis propuesto en esta tesis, se han juzgado como aspectos básicos para la viabilidad de la explotación minera que el territorio donde se ubica el yacimiento a explotar cuente con un acceso adecuado a las redes de transporte que permitan movilizar el producto extraído hasta el punto donde vaya a ser consumido, así como al suministro de servicios imprescindibles para el desarrollo de determinados procesos mineros y el mantenimiento de la maquinaria y de los edificios auxiliares necesarios para la actividad extractiva. Los elementos que condicionan el acceso al agua fueron ya tratados anteriormente, por lo que en los siguientes párrafos solo serán analizados los relacionados con el resto de los servicios considerados.

La polarización demográfica y económica que sufre la región aragonesa en torno a su capital, Zaragoza, sumado al hecho de que esta localidad se localice en el paso de varios de los corredores más importantes del país, lo que la convierte en un nodo de comunicaciones de gran relevancia en el contexto nacional, influyen en que dicha ciudad se convierta en el centro por el que pivota gran parte de la red de transportes de la región («Atlas de Aragón», s. f.). Todo esto condiciona una configuración de tipo radial de las infraestructuras destinadas al transporte terrestre, que asegura un mayor acceso a esta red a los territorios localizados en el entorno de la capital aragonesa (Figura 3.80.).

Según datos del Atlas de Aragón, la red de carreteras de Aragón suma, en total, más de 18.615 km, y está integrada por la red de carreteras del Estado, la red Autonómica y otras

vías dependientes de las diputaciones provinciales. Las dos únicas autopistas presentes en la Comunidad Autónoma aragonesa discurren casi exclusivamente por la provincia de Zaragoza. Se trata de la AP-68 desde Bilbao hasta Zaragoza y de la AP-2 desde Zaragoza hasta El Vendrell, sumando entre ambas algo más de 274 km. Las autovías son relativamente más numerosas. La que presenta un mayor recorrido dentro de Aragón es la autovía Mudéjar o A-23, que recorre toda la comunidad de norte a sur uniendo las tres capitales de provincia, siendo la única autovía que discurre por el territorio turolense. Las carreteras correspondientes al resto de categorías son mucho más frecuentes y su distribución más homogénea.

Por su parte, la red ferroviaria aragonesa (Figura 3.80.) cuenta con 1.252 km de vías activas («Atlas de Aragón», s. f.). Las líneas férreas presentan una distribución asimilable, de forma genérica, a la de las vías rápidas del transporte automovilístico, adquiriendo un marcado carácter radial con vértice en la ciudad de Zaragoza.

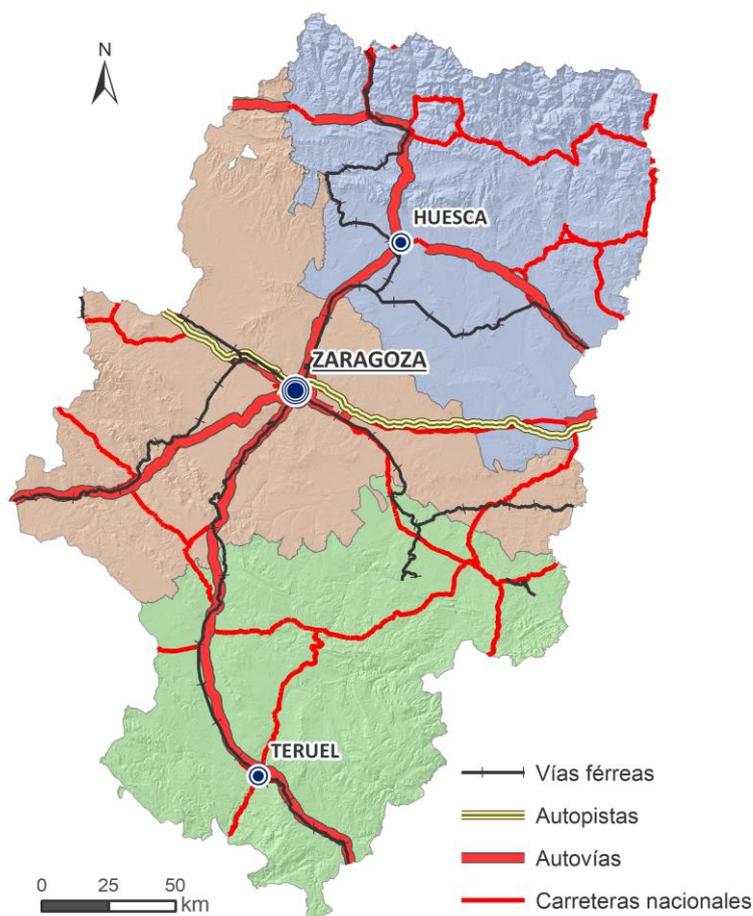


Figura 3.80. Red de transportes de Aragón. Elaboración propia. Fuente: Base Cartográfica Nacional.

En lo que se refiere al acceso a la electricidad (Figura 3.81.), en el momento en el que se generó la Base Cartográfica Nacional (Instituto Geográfico Nacional, 2011), producto del que procede la información referente a las infraestructuras para la producción y transporte de energía eléctrica, existían dentro del territorio aragonés numerosas centrales destinadas a la generación de electricidad. Destacan las centrales térmicas, que emplean la energía liberada por la combustión de parte del carbón extraído en el territorio para el proceso de generación de electricidad. Cabe destacar que algunas de estas centrales ya han sido clausuradas, y que para la más importante de ellas, localizada en la localidad de Andorra (Teruel), ha sido fijada ya una fecha de cierre, por lo que en una posible revisión futura de la geobase de datos generada sería conveniente una actualización de estos datos.

En el territorio aragonés son numerosas las centrales que emplean recursos renovables para la generación de energía eléctrica. En el valle del Ebro, especialmente en la ribera alta, y en algunas otras áreas de la comunidad en las que el viento es un factor casi perenne, han

proliferado las centrales de tipo eólico. El gran número de horas de sol de las que goza gran parte del territorio aragonés ha favorecido, también, el desarrollo de centrales solares. Estas son especialmente numerosas en el margen occidental de la provincia de Zaragoza.

Finalmente, las centrales que aprovechan la fuerza del agua para la producción de energía eléctrica se ubican en las proximidades de embalses situados en las provincias de Huesca y de Teruel.

Las subestaciones eléctricas son instalaciones que producen, convierten, transforman, regulan, reparten y distribuyen la energía eléctrica (Erenovable, 2017). Su localización en el territorio es bastante irregular, concentrándose en las áreas más pobladas de la comunidad, especialmente en el entorno de la ciudad de Zaragoza. El valle del Ebro, y los ejes que unen la capital aragonesa con Huesca, Calatayud y Teruel son las áreas que aglutinan un mayor número de estas entidades.

En cuanto al cableado destinado al transporte de la electricidad a través del territorio, su distribución es asimilable a la del resto de infraestructuras analizadas hasta el momento. No obstante, no muestran un modelo radial tan marcado, puesto que, mientras un gran número de redes de alta tensión pivotan en torno a la ciudad de Zaragoza, existen conducciones que esquivan esta localización, como la que cruza la provincia de Huesca y que se dirige al norte de Cataluña desde la ciudad de Pamplona, o la que une las ciudades de Teruel y Calatayud. La mayor parte de las líneas de baja tensión parten de la red de alta tensión, conectándolas entre sí, o con las áreas del territorio más despobladas.

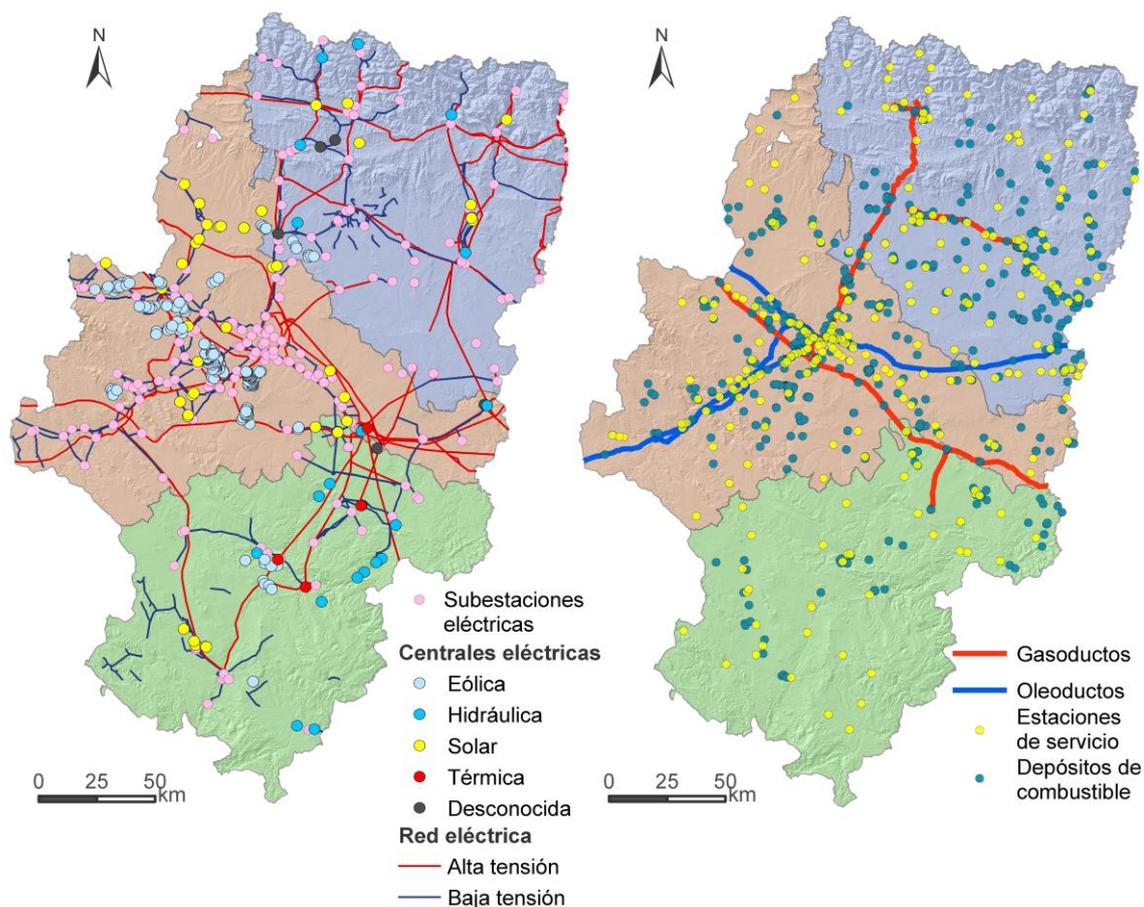


Figura 3.81. (Izquierda): Centrales y subestaciones eléctricas y líneas de alta y baja tensión. Elaboración propia a partir de datos de la Base Cartográfica Nacional (Instituto Geográfico Nacional, 2011).

Figura 3.82. (Derecha): Conducciones y depósitos de combustible y estaciones de servicio en la Comunidad Autónoma de Aragón. Elaboración propia a partir de datos de la Base Cartográfica Nacional (Instituto Geográfico Nacional, 2011).

Como ocurría con las infraestructuras destinadas al transporte de personas y mercancías, la red de transporte del combustible también tiene una distribución radial en el territorio aragonés, con la ciudad de Zaragoza como epicentro (Figura 3.82.). La Comunidad Autónoma de Aragón cuenta con tres oleoductos que convergen alrededor de la ciudad de Zaragoza. El primero de ellos, de más longitud, transporta el combustible desde Rota, en la provincia de Cádiz, atravesando, dentro de la región aragonesa, la cuenca del Jalón por la ciudad de Calatayud. Tarragona es la ciudad de origen del segundo oleoducto que atraviesa la Comunidad, discurriendo al norte de la cuenca del Ebro hasta la capital aragonesa. El tercer y último tramo de la red de oleoductos españoles parte de la capital aragonesa y se encamina hacia Navarra, siguiendo el valle del Ebro.

En lo que respecta a los gasoductos, el principal es el que transporta el gas natural entre Barcelona y el País Vasco, atravesando el valle del Ebro por la ciudad de Zaragoza. Este conducto de gas se bifurca en la ribera baja del Ebro hasta conectar con la central térmica de Andorra. Desde la capital aragonesa surge otra canalización de gas hacia el norte, hasta el Pirineo. El último de los gasoductos presentes en la comunidad enlaza Barbastro con la capital oscense.

Las estaciones de servicio son lugares destinados al suministro de combustible a pequeña escala. Su distribución en el territorio aragonés queda determinada por su objetivo principal de abastecimiento de vehículos de particulares, puesto que la mayor parte de estos elementos se localizan en las proximidades de las principales carreteras que recorren la comunidad. En el momento en el que se generó la Base Cartográfica Nacional, fuente de la que se obtuvo esta información, existían en el territorio aragonés 534 estaciones de servicio, de las cuales 118 se encontraban en las proximidades de la ciudad de Zaragoza.

El número de depósitos de combustible presentes en la comunidad aragonesa en el momento de la creación de la base de datos era de 1.278, de los cuales más de la mitad se encontraban en la provincia de Zaragoza. Le seguía Huesca, con más de 500 depósitos, la mayoría en la frontera con Cataluña, y finalmente, Teruel, con tan solo 107. La distribución espacial de estos elementos no seguía un patrón tan marcado como la de las estaciones de servicio, si bien, si existía una cierta correlación entre la ubicación de los depósitos de combustible y las vías de transporte principales, las cuales, a su vez, se relacionan con la población asentada en el territorio.

En el Anexo I se exponen los mapas que caracterizan la accesibilidad a las diferentes redes infraestructurales analizadas (transporte, agua, electricidad y combustible: mapas IS2.1, IS2.2, IS2.3, e IS2.4), según los criterios empleados en el análisis propuesto, así como la accesibilidad, de un modo conjunto, a todos los elementos incorporados en el análisis (mapa IS2). Como era previsible, atendiendo a todo lo mencionado hasta el momento, los valores de accesibilidad más altos a las infraestructuras y a los servicios estudiados se localizan en el valle del Ebro, en el entorno de la ciudad de Zaragoza. Los valores de accesibilidad serán también altos o muy altos en áreas como el valle del río Jalón entre las ciudades de

Calatayud y Zaragoza, el valle del río Gállego y el entorno de la capital oscense y la comarca del Somontano de Barbastro. El corredor por el que discurre la autovía mudéjar entre Zaragoza y Valencia, y que une la capital autonómica con la ciudad de Teruel, presenta valores medios o localmente altos en el entorno de los núcleos de población más importantes. Por el contrario, los valores de accesibilidad más bajos están ligados a las áreas montañosas, tanto pirenaicas como de la Ibérica, así como a las comarcas de las Cinco Villas y los Monegros.

#### *3.4.2.4. Distribución de las masas boscosas y de los usos del suelo*

En la minería a cielo abierto el acceso al cuerpo mineralizado implicará la movilización de la cobertura edáfica y el material rocoso localizado sobre él, provocando el desbroce de las especies vegetales del entorno en el que se lleva a cabo la actividad. Además, los usos del suelo, y las características físicas y químicas de este compartimento del medio también van a verse modificadas en el entorno de la labor minera por la disposición de balsas y escombreras para el almacenamiento de materiales estériles o residuos del tratamiento del proceso metalúrgico. Además, la replantación de la vegetación destruida durante el desarrollo de la actividad minera ha demostrado ser difícil porque estos procesos alteran profundamente las propiedades del suelo (Angela Akanwa, Chike Mba, y Uloma Jibrum, 2017).

La gran capacidad de la minería para modificar los usos del suelo hace necesario elaborar estudios que analicen las características de los terrenos que van a ser empleados como soporte para el desarrollo de las labores extractivas, siendo preciso conocer las actividades que se están llevando a cabo en el momento actual en su entorno. Este análisis debe poner un énfasis especial en determinar las características florísticas y forestales, siendo incluso recomendable descartar zonas por presentar un especial valor ecológico. No en vano, la actividad minera genera una serie de impactos en las propiedades físicas y químicas de los suelos sobre los que se desarrolla, una modificación de los regímenes hidrológicos e hidrogeológicos y una degradación general del medio físico de los terrenos afectados, que puede traducirse en la destrucción de la cobertura vegetal y la pérdida del hábitat de muchas especies forestales. Incluso cuando cesa la actividad minera y es restaurado el

espacio afectado, será extremadamente difícil que el medio recupere el estado anterior a la perturbación, al verse modificadas sus propiedades edáficas e hidrológicas.

Todo esto justifica la realización de estudios que analicen las características de la cobertura vegetal de los terrenos que se verían afectados por la acción minera, no solo por su valor individual, sino también como soporte para el desarrollo de ecosistemas completos.

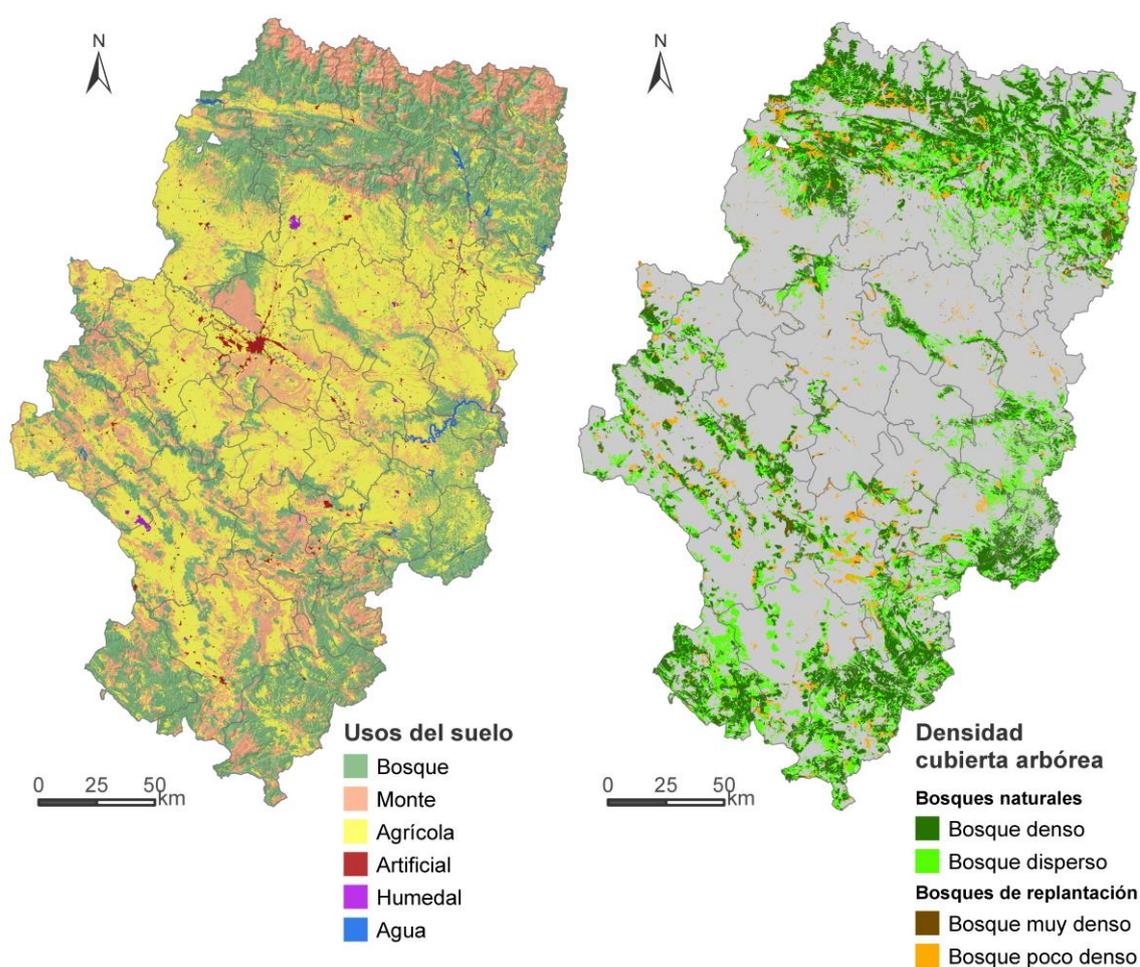
Ya en el contexto aragonés, puede destacarse que una gran parte del territorio está destinado a la producción agrícola y ganadera (Figura 3.83.), casi un 44% del total según datos del Mapa Forestal de España (Ministerio para la Transición Ecológica, 2006). Este uso del suelo se encuentra presente, en un mayor o menor porcentaje, en todo el territorio, (en comarcas como La Ribagorza o el Maestrazgo su extensión es muy limitada en comparación con otras como los Monegros o el Campo de Belchite, en el que las tierras de labranza ocupan un elevado porcentaje del territorio), si bien son especialmente frecuentes en las áreas llanas de la depresión del Ebro y en las fosas que individualizan los ramales del Sistema Ibérico.

Los bosques y el monte arbolado son el siguiente tipo de uso de suelo más común en el territorio. Son especialmente frecuentes en áreas elevadas de pendientes medias o fuertes poco propicias para el desarrollo de la actividad agraria. Algunas comarcas emplazadas en la Ibérica turolense, como la Sierra de Albarracín, Gúdar-Javalambre y el sur del Maestrazgo y del Matarraña, así como las áreas localizadas en el Prepirineo y la depresión intrapirenaica y las Sierras Interiores, muestran un porcentaje elevado del territorio ocupado por el monte arbolado de origen natural. Fuera de estas regiones los bosques solo alcanzan extensiones destacables en la Sierra de Alcubierre y los Montes de Castejón, ambas localizadas en la frontera entre las provincias de Zaragoza y Huesca, en el entorno del Moncayo y en algunos tramos de la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica.

Las grandes alturas alcanzadas en el Pirineo Axial y en las cumbres más elevadas de la Cordillera Ibérica impiden el desarrollo de un estrato arbóreo importante, por lo que los encargados de elaborar el Mapa Forestal de España incorporaron estas áreas a la categoría de monte desarbolado. A esta misma categoría pertenecen extensas áreas poco aptas para las actividades agrícolas, pero muy secas para el desarrollo de bosques, situadas en la

depresión del Ebro y en el Sistema Ibérico. Se trata de zonas dominadas por la presencia de matorral.

El resto de tipos de suelo no presentan una superficie destacable. Existen, pequeñas parcelas, localizadas principalmente en el Prepirineo, en las Sierras Interiores y en la Cordillera Ibérica, se corresponden con el monte arbolado de origen antrópico. Por otro lado, las áreas catalogadas como artificiales solo presentan cierta continuidad en el entorno de la ciudad de Zaragoza y, mucho más limitadas, en las otras dos capitales provinciales.



*Figura 3.83. (Derecha): Distribución de los usos del suelo y de las masas boscosas en el territorio. Elaboración propia a partir de los datos del Mapa Forestal de España.*

*Figura 3.84. (Izquierda): Masas boscosas de la región aragonesa diferencias en función de su origen natural o antrópico y de la densidad de la cubierta arbórea, según los criterios establecidos para este indicador. Elaboración propia a partir de los datos del Mapa Forestal de España.*

Los autores de la base de datos del Mapa Forestal diferencian hasta 35 tipos estructurales de usos de suelo y usos forestales, aunque al tratarse de un mapa a escala nacional, algunos

pueden no estar presentes en el marco regional de este trabajo. Estos tipos estructurales serán aprovechados como base para la creación de una serie de grupos categóricos que sirvan para valorar las afecciones a la cobertura vegetal y a las áreas forestales, grupos que serán expuestos en el capítulo IV de la tesis.

En el establecimiento de las categorías que servirán para valorar el indicador correspondiente se pensó que, para esta tesis, sería conveniente diferenciar las masas forestales en varias categorías con una valoración propia en función de su grado de desarrollo, utilizando el dato de la densidad arbórea de la masa boscosa presente en la fuente empleada. Siguiendo este criterio, las masas forestales de origen natural fueron diferenciadas en bosque denso, cuando el porcentaje de ocupación era igual o mayor al 50% y bosque disperso cuando la ocupación era inferior a este porcentaje. En el caso de las masas forestales cuyo origen es antrópico, es decir, resultado de un proceso de replantación, el límite establecido para la categorización en función de la densidad de ocupación fue establecido en un 75% (Figura 3.84.).

*Tabla 3.3. Especies vegetales cuya extensión supone menos de un 0,02% del total de la superficie vegetal de Aragón. Elaboración propia.*

<i>ESPECIE</i>	NOMBRE	<i>ESPECIE</i>	NOMBRE	<i>ESPECIE</i>	NOMBRE
<i>Acacia spp.</i>	Acacia	<i>Cupressus macrocarpa</i>	Ciprés americano	<i>Rhus coriaria</i>	Zumaque
<i>Ailanthus altissima</i>	Ailanto	<i>Frangula alnus</i>	Arraclán	<i>Robinia pseudacacia</i>	Acacia robinia
<i>Amelanchier ovalis</i>	Guillomo	<i>Hacer platanoides</i>	Arce platanoide	<i>Salix atrocinerea</i>	Bardaguera
<i>Betula pendula</i>	Abedul péndula	<i>Hacer pseudoplatanus</i>	Arce seudoplátano	<i>Salix babylonica</i>	Sauce llorón
<i>Castanea sativa</i>	Castaño	<i>Juglans regia</i>	Nogal	<i>Salix caprea</i>	Sauce cabruno
<i>Cedrus atlantica</i>	Cedro	<i>Mezcla de frondosas de gran porte</i>		<i>Salix elaeagnos</i>	Sarga
<i>Cedrus libani</i>	Cedrus libani	<i>Phillyrea latifolia</i>	Labiérnago	<i>Salix purpurea</i>	Mimbrera
<i>Celtis australis</i>	Almez	<i>Pistacia terebinthus</i>	Cornicabra	<i>Tilia cordata</i>	Tilo cordata
<i>Ceratonía siliqua</i>	Algarrobo	<i>Platanus hispanica</i>	Plátano	<i>Tilia platyphyllos</i>	Tilo común
<i>Cornus sanguinea</i>	Cornejo	<i>Prunus avium</i>	Cerezo silvestre	<i>Tilia spp.</i>	Tilo
<i>Crataegus spp.</i>	Crataegus	<i>Pyrus spp.</i>	Peral silvestre	<i>Ulmus glabra</i>	Olmo montano
<i>Cupressus lusitanica</i>	Ciprés lambertiana				

Por otro lado, Oyarzun, Higuera y Lillo (2011) proponen como medida previa a la fase de explotación, e incluso a la de exploración minera, la realización de inventarios faunísticos y florísticos, especialmente encaminados a la protección de especies en peligro de extinción. En este sentido, el Gobierno de Aragón, proporciona un catálogo de Especies Amenazadas en la comunidad. La mayoría de las especies inventariadas en este catálogo se corresponden con musgos y plantas inferiores cuya distribución está muy limitada a algunas localizaciones concretas, por lo que resulta muy complicado incluirlas en un análisis a escala regional. Sin embargo, en el catálogo de flora de interés especial sí que se incorporan varias especies arbóreas cuya distribución se encuentra bien definida en el Mapa Forestal. Estas especies son el tamariz (*Tamarix boveana*), la sabina albar o sabina blanca (*Juniperus thurifera*) y el acebo (*Ilex aquifolium*).

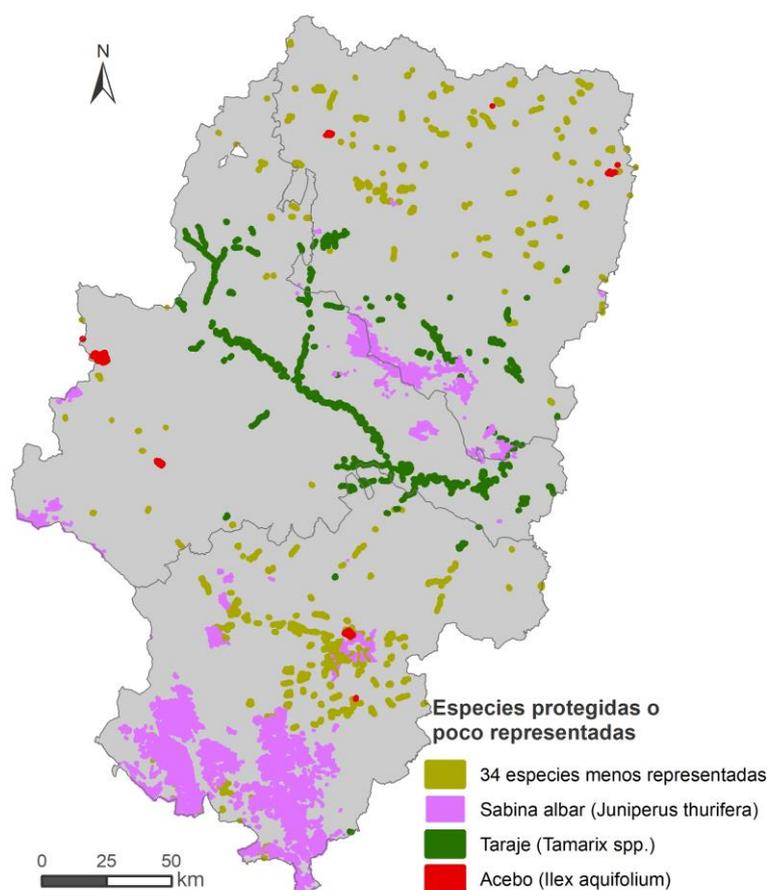


Figura 3.85. Mapa que refleja la distribución de las 34 especies vegetales menos frecuentes dentro de la región aragonesa, así como la de las especies protegidas en la comunidad. Elaboración propia a partir de los datos del Mapa Forestal de España (Ministerio para la Transición Ecológica, 2006) y del Catálogo de Especies Amenazadas del Gobierno de Aragón (Gobierno de Aragón, 2007).

No obstante, existen en la comunidad aragonesa ciertas especies vegetales que a pesar de que su protección no sea considerada de interés prioritario, se encuentran muy limitadas en la región y su presencia está muy localizada en espacios concretos y poco extensos. En esta tesis, para determinar cuáles eran estas especies se analizó la extensión del territorio en el que dicha especie se localiza, calculando, posteriormente, el porcentaje que la extensión de cada especie suponía con respecto del total de la superficie arbórea de Aragón y estableciéndose, finalmente un límite que diferenciara las especies menos representadas de aquellas más comunes en el territorio aragonés. Este umbral, fijado en el 0,02%, determinó la presencia de 34 especies arbóreas poco representadas dentro de la Comunidad Autónoma Aragonesa. (Tabla 3.3. y Figura 3.85.).

#### 3.4.2.5. Figuras de protección del patrimonio natural y cultural

El territorio aragonés cuenta con numerosos espacios que, debido a sus características naturales o arquitectónicas, han sido distinguidos por las autoridades pertinentes como localizaciones meritorias de que su esencia y sus peculiaridades sean salvaguardadas. Para ello, tanto el Gobierno de Aragón como el del Estado Español, cuentan con diversas herramientas, que en esta tesis han sido nombradas como *figuras de protección*. La mayoría de los regímenes de protección reconocibles dentro de la Comunidad Autónoma de Aragón están orientadas al mantenimiento y mejora de espacios naturales, poniendo especial énfasis en la protección de humedales, montes, hábitats, formaciones geológicas y otros elementos naturales que supongan hitos de interés por su flora, fauna, valores paisajísticos, naturales, científicos y didácticos, o por su geomorfología. Otras figuras de protección se encaminan a la salvaguarda de todos los bienes materiales e inmateriales relacionados con la historia de la región que cuenten con interés antropológico, histórico, artístico, arquitectónico, paleontológico y arqueológico, entre los que incluyen monumentos, edificios representativos de la historia de la Comunidad y yacimientos paleontológicos y arqueológicos, entre otros. Prácticamente todos los elementos incluidos en la categoría genérica de lugares de interés empleados en este trabajo cuentan con una legislación aprobada por los órganos pertinentes, en las que se recogen, amén de otros aspectos, un catálogo configurado por los elementos o espacios dignos de ser conservados, así como un

conjunto de actividades permitidas y/o prohibidas. En lo concerniente a la minería y a las labores extractivas en general, que constituyen la esencia de esta tesis, no aparece como una actividad vetada en ninguna de las figuras de protección estudiadas, a excepción de en los Parques Nacionales. Sin embargo, el desarrollo de actividades mineras en varios de estos espacios se podría ver muy limitado por las restricciones legales impuestas, siendo necesario en muchos casos la aprobación por el organismo competente de proyectos previos de corte ambiental que muestren el grado de afección que supondría en los elementos a proteger el inicio de una actividad de estas características.

En los siguientes párrafos será analizado el alcance de estas figuras de protección en el territorio aragonés y su distribución espacial concreta. También serán mencionadas las actividades en ellos vetadas. Las figuras desarrolladas serán las siguientes:

- 1) RED NATURA 2000
  - a. Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPA)
  - b. Lugares de Importancia Comunitaria (LIC)
  - c. Zona de Especial Conservación (ZEC)
- 2) Espacios Naturales Protegidos
  - a. Parques nacionales
  - b. Parques naturales
  - c. Reservas naturales
  - d. Monumentos naturales
  - e. Paisajes protegidos
- 3) Reservas de la Biosfera
- 4) Humedales Singulares de Aragón
- 5) Lugares de Interés Geológico
- 6) Montes de Aragón
- 7) Ámbitos de Protección de Especies y Áreas Críticas
- 8) Zonas de Protección para la Avifauna
- 9) Puntos Singulares, Bienes de Interés Cultural y Árboles Singulares

La *Red Natura 2000* es el principal instrumento de conservación de la naturaleza en la Unión Europea. Se trata de una red ecológica para la conservación de la biodiversidad, cuyo fin último es asegurar la supervivencia a largo plazo de las especies y los tipos de hábitat en Europa. Está formada por *Zonas Especiales de Conservación (ZEC)*, así como por los *Lugares de Importancia Comunitaria (LIC)* hasta su transformación en *ZEC*, establecidas ambas de acuerdo a la Directiva de Hábitats, y por las *Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPA)*, designadas en virtud de la Directiva de Aves. La Figura 3.86. muestra la distribución estas figuras de protección.

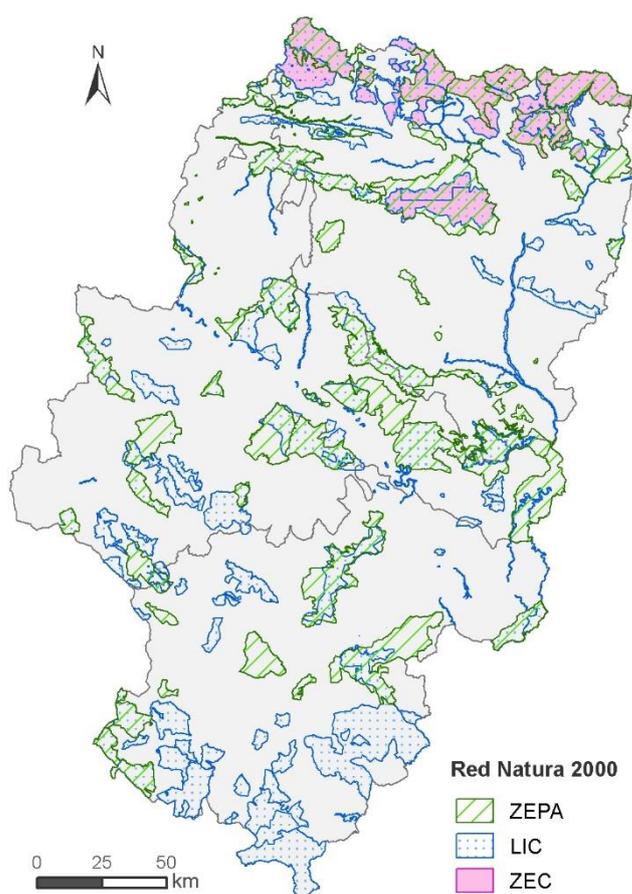


Figura 3.86. Distribución de las figuras de protección que engloba la Red Natura 2000. Elaboración propia.

Los *Lugares de Importancia Comunitaria* son aquellos espacios que contribuyen de forma apreciable al mantenimiento o al restablecimiento del estado de conservación favorable de los tipos de hábitat naturales y los hábitat de las especies de interés comunitario en su área de distribución natural (Ley 42/2007, de 13 de diciembre; Jefatura del Estado, 2007). Aragón cuenta actualmente con 183 espacios declarados como *Lugares de Importancia Comunitaria*,

repartidos por todo su territorio, aunque se encuentran especialmente concentrados en las áreas pirenaicas y las serranías meridionales de la Cordillera Ibérica. Algunos de los espacios incluidos en las categorías anteriores constituyen *Zonas Especiales de Conservación*, por su gran interés medioambiental para la conservación de la diversidad. Por su parte, en las *Zonas de Especial Protección para las Aves* se prohíbe o limita la caza de aves, debiendo, asimismo garantizarse las condiciones medioambientales idóneas para el descanso, reproducción y alimentación de las aves.

La legislación que protege a las áreas incluidas dentro de la Red Natura 2000 especifica un protocolo de actuación ante la planificación de cualquier proyecto que afecte a alguno de estos lugares. De esta manera, se exige que todo plan o proyecto que pueda tener una repercusión significativa en un lugar Natura 2000 sea sometido a una evaluación adecuada, para estudiar sus consecuencias. Dependiendo de los resultados del análisis, la autoridad competente puede aprobar el proyecto si se concluye que no afectará negativamente a la integridad del lugar o, dependiendo del grado de impacto, exigir soluciones para eliminar los efectos negativos o respetar ciertas condiciones durante las fases de construcción, explotación o cierre del proyecto.

El texto en el cual se recogen el establecimiento y las características de los *Espacios Naturales Protegidos* es el Decreto Legislativo 1/2015, de 29 julio (Departamento de Desarrollo Rural y Sostenibilidad, 2015b), en el que se aprueba el texto refundido de la *Ley de Espacios Protegidos de Aragón* (Figura 3.87.). Dicha ley dispone que podrán ser declarados como espacios naturales protegidos aquellas áreas del territorio que contengan elementos y sistemas naturales de especial interés o valores naturales o culturales sobresalientes.

Destacan en primer lugar los *parques nacionales*, espacios naturales de alto valor ecológico y cultural, poco transformados por la explotación o actividad humana que, en razón de la belleza de sus paisajes, la representatividad de sus ecosistemas o la singularidad de la flora, de su fauna, de su geología o de sus formaciones geomorfológicas, poseen unos valores ecológicos, estéticos, culturales, educativos y científico destacados, cuya conservación merece una atención preferente. En Aragón existe un único espacio

establecido como *parque nacional*. Se trata del parque de Ordesa y Monte Perdido, localizado en el área central de la cordillera pirenaica.

Los *parques naturales*, por su parte, son espacios poco transformados por la exploración u ocupación humana que, en razón de la belleza de sus paisajes, la representatividad de sus ecosistemas o la singularidad de su flora, de su fauna o de sus formaciones geomorfológicas, poseen unos valores ecológicos, estéticos, educativos y científicos cuya conservación merece una atención preferente, en los que la existencia del hombre y sus actividades son compatibles con el proceso dinámico de la naturaleza a través de un uso equilibrado y sostenible de los recursos (Departamento de Desarrollo Rural y Sostenibilidad, 2015b). Existen cuatro *parques naturales* en la región, tres en la provincia de Huesca (*Valles Occidentales, Ordesa y Monte Perdido y Sierra y los Cañones de Guara*) y el *Moncayo* en Zaragoza.

Las *reservas naturales* son espacios naturales de dimensión moderada, cuya declaración tiene como finalidad la protección de ecosistemas, comunidades o elementos biológicos que por su rareza, fragilidad, importancia o singularidad merecen una valoración especial. Aragón cuenta con tres *reservas naturales*: los *Sotos y Galachos del Ebro*, las *Saladas de Chiprana* y la *Laguna de Gallocanta*.

Los *monumentos naturales* consisten en espacios o elementos de la naturaleza constituidos básicamente por formaciones de notoria singularidad, rareza o belleza, que merecen ser objeto de una protección especial. En Aragón se distinguen 13 *monumentos naturales* diferentes.

Por último, los *paisajes protegidos* son lugares concretos del medio natural merecedores de una protección especial de acuerdo con el convenio del paisaje del Consejo de Europa, por sus valores naturales estéticos y culturales. En los *paisajes protegidos* se procurará el mantenimiento de las prácticas de carácter tradicional que contribuyan a la preservación de sus valores y recursos naturales. En Aragón hay cuatro figuras de este tipo: las *Fozes de Fago y Biniés*, los *Pinares de Rodeno, San Juan de la Peña y Monte Oroel* y la *Sierra de Santo Domingo*.

La ley por la que se declaran los *Espacios Naturales Protegidos* incluye también un apartado destinado al régimen de usos, incorporando una consideración de actividades permitidas y prohibidas. En el apartado de prohibidos se encuentran todos los que sean incompatibles con las finalidades de protección del espacio natural protegido. La actividad minera no se encuentra en la lista de actividades prohibidas, sin embargo, deberá ser sometida a trámites de autorización, que tendrán que ser concedida por el organismo pertinente. Sin embargo, la normativa del *Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido*, el único existente en Aragón, considera entre las actividades incompatibles con los fines del Parque Nacional, las actividades mineras y extractivas, así como los trabajos de investigación, exploración o explotación con fines mineros, por lo que no se otorgarán nuevas concesiones autorizaciones ni permisos en el área del Parque Nacional («Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido: normativa», s. f.).

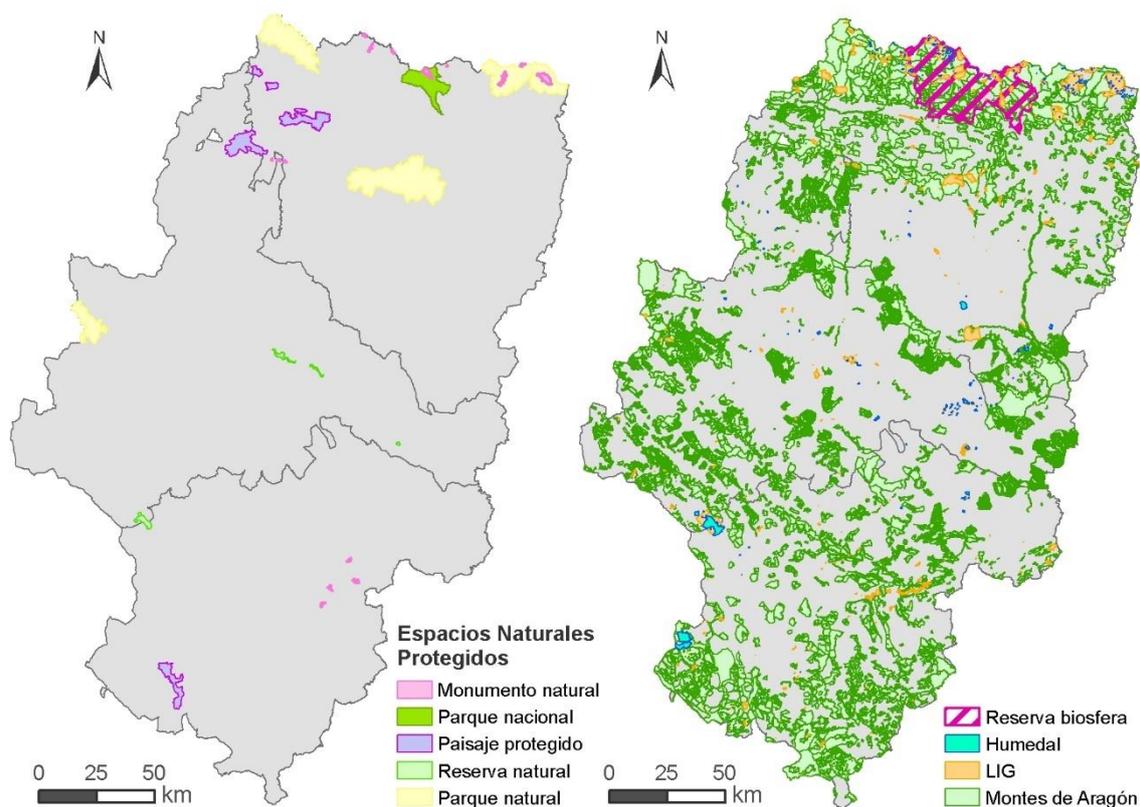


Figura 3.87. (Izquierda): Espacios Naturales Protegidos de Aragón. Elaboración propia.

Figura 3.88. (Derecha): Distribución de los LIGs, Humedales, Reservas de la biosfera y Montes de Aragón. Elaboración propia.

Por su parte, las *Reservas de la Biosfera* (Figura 3.88.) son espacios representativos de una región biogeográfica significativa, que contienen paisajes, ecosistemas o recursos naturales y culturales de interés, cuentan con unas condiciones sociales, económicas y naturales que facilitan la aplicación de la filosofía del desarrollo sostenible, o presentan una extensión suficiente para cumplir las funciones de conservación y desarrollo (UNESCO, s. f.). En Aragón existe un solo espacio con la denominación UNESCO de *Reserva de la Biosfera*, denominado Ordesa-Viñamala. El borrador del Plan de Gestión de Reserva de la Biosfera de Ordesa-Viñamala contempla como actividades prohibidas todas aquellas que se reconocen incompatibles con las finalidades de protección de los espacios naturales protegidos y que vienen recogidas en otro tipo de instrumentos como el Plan Rector de Uso y Gestión para el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido.

Por otro lado, y a pesar de que previamente ya existían figuras de protección, como la *Red Natura 2000*, que otorgaban una defensa específica algunos de los humedales de Aragón, el gobierno de esta región, consciente de la importancia para la conservación de la diversidad que suponen este tipo de ecosistemas, otorgó mediante el Decreto 204/2010, de 2 de noviembre (Departamento de Medio Ambiente, 2010a), un régimen de protección a un número mayor de humedales de la región. Concretamente, fueron objetivo de este Decreto aquellos humedales que se identifican como elementos singulares de conservación, con el fin de amparar y garantizar la adecuada preservación de este tipo de espacios naturales que no gozaban de ningún régimen de protección de forma previa. Con ellos se elaboró el *Inventario de Humedales de Aragón*, que contiene 369 registros correspondientes a lagunas, ibones, balsas, charcas, embalses, estanques, lagos, pantanos y otros tipos de humedales. Gran parte de estos humedales se encuentran localizados en el área pirenaica y, en menor medida, en la depresión del Ebro (Figura 3.88.).

Entre los usos incompatibles ligados a estas figuras de protección se encuentran las actividades que puedan producir la desecación o alteración hidrológica del humedal, las modificaciones en la cubeta o en las características morfológicas del humedal, los vertidos sólidos y líquidos que afecten de forma negativa a la calidad de las aguas o la captura de animales silvestres, entre otras muchas. En referencia a la minería, el artículo 11 del decreto

regulador especifica como prohibido el otorgamiento de nuevos aprovechamientos mineros en el ámbito del humedal, incluidos los permisos de investigación.

La siguiente categoría analizada coincide con los *Lugares de Interés Geológico* de Aragón (Figura 3.88.), que están regulados por el Decreto 274/2015 con fecha del 4 de noviembre (Departamento de Desarrollo Rural y Sostenibilidad, 2015a). Por este decreto se consideran *Lugares de Interés Geológico* aquellas superficies con presencia de recursos geológicos de valor natural, científico, cultural, educativo o recreativo, ya sean formaciones rocosas, estructuras, acumulaciones sedimentarias, formas, paisajes, yacimientos paleontológicos o minerales.

Una vez que un área es incluida en el catálogo de Lugares de Interés Geológico de Aragón, deberá ser preservada de actividades susceptibles de provocar su recesión y degradación. Todas las actividades que directa o indirectamente puedan producir la alteración morfológica significativa del lugar estarán prohibidas: vertidos sólidos y líquidos, nuevas infraestructuras viarias, energéticas y de telecomunicaciones, emisión de ruidos, etc. En cuanto a las labores mineras, en estas zonas la actividad está bastante restringida, puesto que el otorgamiento de nuevos aprovechamientos mineros en el ámbito del Lugar de Interés Geológico estará vetada. De los aprovechamientos ya otorgados no se menciona que la extracción minera sea una actividad explícitamente prohibida, aunque el cumplimiento del resto de restricciones contempladas limitaría enormemente su desarrollo.

La figura de protección para los *Montes en Aragón*, que sistematiza la política forestal, su ordenación y gestión, es regulada por la Ley 15/2006, de 28 de diciembre, de Montes de Aragón. Los objetivos de esta ley consisten en regular los montes situados en el ámbito territorial de la región para la protección y desarrollo del patrimonio forestal. En la actualidad están registrados dentro del catálogo de Montes de Aragón 2768 recintos distribuidos por todo el territorio (Figura 3.88.), aunque principalmente concentrados en la cordillera pirenaica y en el Sistema Ibérico, especialmente en las serranías más meridionales de la provincia de Teruel y en los alrededores del Moncayo.

La *Ley de Montes* obliga a solicitar autorización para realizar actividades tales como la apertura de nuevas vías o pistas forestales y el ensanche de las existentes o el

aprovechamiento de la madera. Asimismo, el Instituto Aragonés de Gestión Ambiental es el responsable de la emisión de informes sobre actividades extractivas de recursos mineros que afecten a estos montes, y deberá certificar la compatibilidad de la actividad con la persistencia de los valores naturales originales. Esta institución puede exigir el sometimiento del proyecto a evaluación de impacto ambiental.

Por otro lado, y según lo establecido en la Ley 42/2007 del BOE (Jefatura del Estado, 2007), la inclusión de especies en el *Catálogo Español de Especies Amenazadas* y en el *Catálogo de Especies Amenazadas de Aragón* conlleva la aplicación de un régimen de protección especial para dichas especies. Con este objetivo, se delimitaron dos tipos de zonas para la protección de las especies amenazadas. La primera de ellas recibe el nombre de *Ámbito territorial del Plan de conservación del hábitat* que presenta unas condiciones de aplicación más laxas que las definidas como *Áreas Críticas*, el segundo tipo, correspondientes a hábitats que se consideran vitales para la supervivencia y conservación de cada especie, incluyendo los territorios de celo, reproducción y refugio invernal. Las actividades que se realicen en las *áreas críticas* deberán tener en cuenta en su planificación y ejecución cualquier efecto que pueda tener sobre la especie o su hábitat, debiéndose adoptar medidas o precauciones para evitar, eliminar, paliar o compensar dichos efectos.

*Las Zonas de Protección para la Avifauna* son unas figuras de protección establecidas por la Resolución de la Dirección General de Desarrollo Sostenible y Biodiversidad, el día 30 de junio de 2010 (Departamento de Medio Ambiente, 2010b). Siguiendo esta resolución se delimitaron una serie de áreas prioritarias de reproducción, alimentación, dispersión y concentración local de las especies de aves incluidas en el Catálogo de Especies Amenazadas de Aragón. Toda el área Pirenaica fue incluida como Zona de Protección para la Avifauna, así como amplios sectores de la cuenca del Ebro y de la Cordillera Ibérica (Figura 3.89.).

Además de los regímenes de protección revisados hasta el momento, destinados a mantener la integridad de áreas más o menos extensas del territorio, conservando los hábitats, la flora y la fauna y otros bienes de interés ambiental y cultural en esos espacios, existen diversos elementos de origen natural o antrópico de escala mucho más reducida (a

efectos cartográficos tendrán una representación puntual) que también presentan el interés suficiente como para ser protegidos (Figura 3.90.).

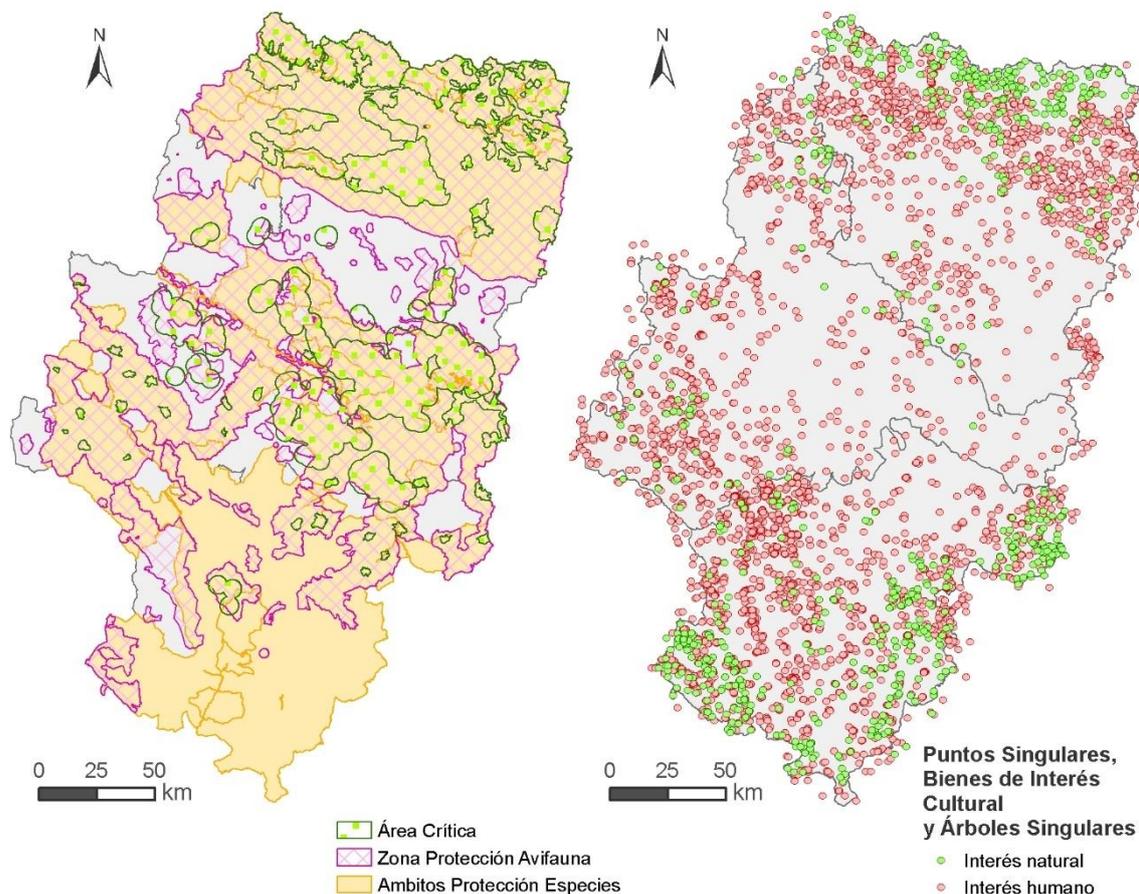


Figura 3.89. (Izquierda) Áreas críticas, Zonas de Protección para la Avifauna y Ámbitos de protección de Especies. Elaboración propia.

Figura 3.90. (Derecha) Distribución de los Puntos Singulares, Bienes de Interés Cultural y Árboles Singulares en el territorio. Elaboración propia.

Algunos de ellos, como los *Bienes de Interés Cultural* y los *Árboles Singulares*, cuentan con diversas legislaciones encaminadas hacia su conservación. La Ley 3/1999, de 10 de marzo, del Patrimonio Cultural Aragonés recoge la figura de los *Bienes de Interés Cultural*. Por dicha ley, en esta categoría se integran todos los bienes materiales e inmateriales relacionados con la historia y la cultura de Aragón que presentan interés antropológico, antrópico, histórico, artístico, arquitectónico, mobiliario, arqueológico, paleontológico, etnológico, científico, etc., tanto si se encuentran en la superficie como en el subsuelo o bajo la superficie de las aguas.

Una vez incluidos en el catálogo de Bienes de Interés Cultural, se asumirán una serie de prohibiciones para mantener su integridad, entre las que se incluye toda construcción que altere su carácter o perturbe u contemplación.

Los *Árboles Singulares* se protegen en el marco del *Decreto 27/2015*, de 24 de febrero (Departamento de Hacienda y Administración Pública y de Agricultura, Ganadería y Medio Ambiente, 2015). Este Decreto otorga la consideración de Árboles Singulares de Aragón a aquellos ejemplares o grupos de árboles, que merecen un régimen de protección especial por presentar características que les confieren un elevado valor, por poseer peculiaridades científicas excepcionales, por las particularidades de su desarrollo o ubicación o por tener un Interés científico, cultural, histórico o social relevante. Los árboles, o conjunto de árboles, incluidos en el inventario de *Árboles Singulares de Aragón* cuentan con un régimen general de protección que excluye las actividades que supongan un peligro para el ejemplar.

Terminamos este apartado refiriéndonos a los *Puntos singulares*, elementos de representación cartográfica puntual que presentan interés arquitectónico, histórico, paisajístico, natural, paleontológico, científico o cultural y están incluidos como puntos de interés en la Base Cartográfica Nacional o en el Catálogo de Elementos Paisajísticos Puntuales y de Enclaves de Especial Interés.

#### 3.4.2.6. Características del paisaje

Las actividades extractivas son cuestionadas por su impacto en el paisaje de los lugares en los que se desarrolla. No hay duda que el paisaje es parte de la relación emocional de la sociedad con el territorio y, por ello, debe ser tenido en cuenta al diagnosticar la inserción territorial de los puntos estudiados en esta tesis. La referencia al paisaje, concepto abstracto, se facilita mediante el manejo de la cartografía de calidad del paisaje.

La fuente de información básica empleada en esta tesis ha sido el Mapa de Calidad de Paisaje de Aragón a escala 1:100.000 (Dirección General de Ordenación del Territorio, 2015). Como indican sus autores, el mapa evalúa los méritos de conservación o el grado de excelencia paisajística y, de este modo, catalogan el territorio aragonés según el interés que presente para ser conservado. Para establecer la calidad del paisaje se analiza en primer

lugar la llamada calidad intrínseca, que depende de las características de la vegetación, suelos y relieve, así como de la presencia de agua o nieve, entre otros aspectos. También se computa en la calidad intrínseca la existencia de elementos singulares que realcen el paisaje -monasterios, castillos, árboles catalogados como singulares, puentes históricos, etc.- o lo degraden -aerogeneradores, antenas y repetidores, cortafuegos, movimientos de tierras, granjas y naves, balsas de purines... En segundo lugar se evalúa la llamada calidad adquirida, que es función del entorno, y viene dada por las vistas que desde cada localización pueden ser observadas. Por ejemplo, si desde una zona de calidad paisajística muy baja pueden observarse áreas de calidad visual mayor, el valor de calidad visual adquirida será más elevado. En el cálculo de la calidad paisajística final, la calidad intrínseca tiene un peso más elevado que a calidad adquirida.

Analizando el Mapa de Calidad del Paisaje aragonés (Figura 3.91.) puede observarse como la mayor parte del territorio se encuentra compartimentado dentro de las categorías catalogadas como de mérito de conservación medio (de 4 a 6). Estas zonas se corresponden en gran medida con las áreas agrícolas más llanas del valle del Ebro, Monegros, Hoya de Huesca, Bajo Aragón y las fosas situadas entre las ramas de la Cordillera Ibérica.

Por su parte, los valores de calidad paisajística más bajos son esencialmente puntuales, excepto en el entorno de las grandes ciudades, en especial de Zaragoza. Se trata de las *teselas* del territorio donde la actividad humana es más remarcable, y en muchos casos asociadas a zonas agrícolas y ganaderas con fuerte presencia de elementos visuales negativos que restan calidad al paisaje. También las grandes explotaciones mineras localizadas en las comarcas turolenses de Andorra-Sierra de Arcos y las Cuencas Mineras han sido calificadas con un valor de calidad paisajística bajo.

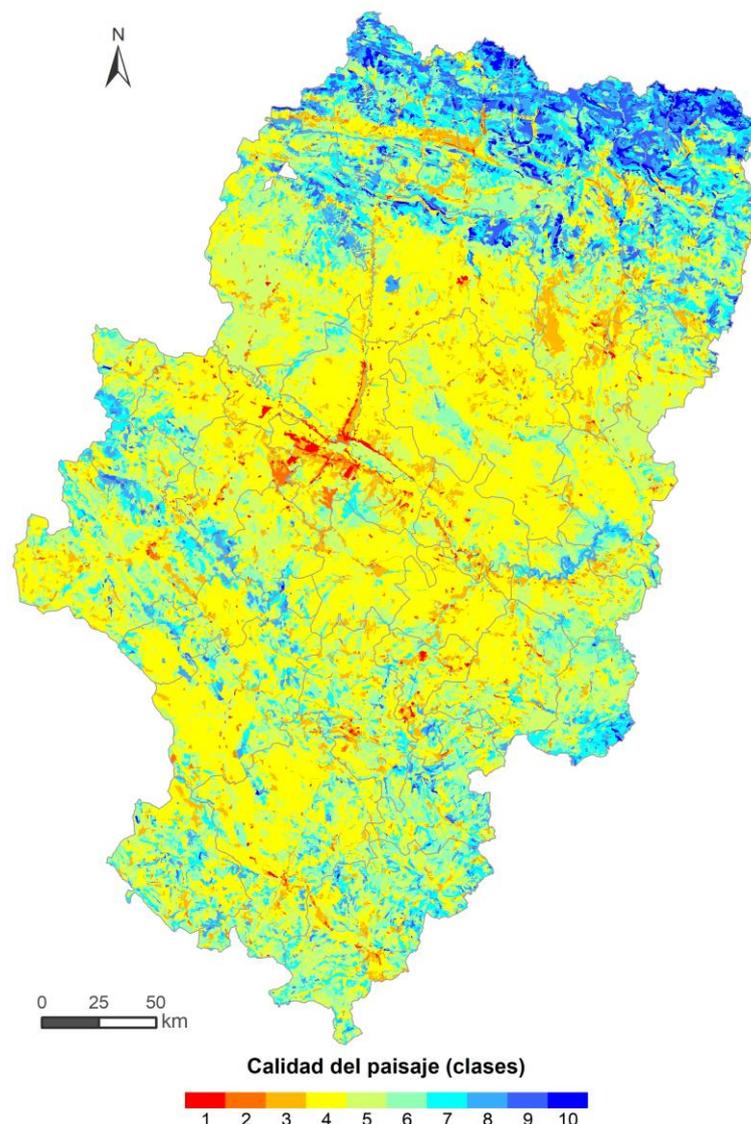


Figura 3.91. Mapa de calidad del paisaje de Aragón. Fuente: Gobierno de Aragón.

Según este mapa, los parajes que presentan un mayor mérito de conservación se localizan, esencialmente, en las zonas montañosas. Los escarpes y las pendientes más pronunciadas reciben un valor muy alto en la variable empleada en el análisis de calidad paisajística correspondiente al relieve, y además, la influencia antrópica en estas áreas es menor que en las más llanas y favorables para el desarrollo de la agricultura, por lo que su valoración en la componente referente a la vegetación y los usos del suelo será también mayor. Los Pirineos y las Sierras Exteriores son el mejor ejemplo de este caso. También pueden localizarse zonas de alta calidad paisajística en diversas áreas del Sistema Ibérico zaragozano, así como en las áreas más elevadas de la comarca del Matarraña. Las Serranías Ibéricas Turolenses, como Albarraçín, Maestrazgo, Gúdar y Javalambre también presentan

valores máximos en algunos puntos, aunque en conjunto pertenecen a categorías inferiores a las que se observan en la zona pirenaica. El embalse de Mequinenza representa un caso especial al presentar valores de calidad paisajística altos en un entorno esencialmente degradado.

## Capítulo IV: La geobase de datos: elementos y diseño del análisis multicriterio, posibilidades y criterio de manejo de los diversos indicadores

4.1. Introducción: análisis multicriterio en geología. Principios y aplicaciones.

4.2. Elementos del análisis multicriterio

4.3. Perfil geológico

4.4. Aptitud del terreno

4.5. Inserción socioeconómica

4.6. Diseño del análisis multicriterio

## LA GEOBASE DE DATOS: ELEMENTOS Y DISEÑO DEL ANÁLISIS MULTICRITERIO, POSIBILIDADES Y CRITERIO DE MANEJO DE LOS DIVERSOS INDICADORES

Tras la presentación de los elementos físicos, sociales y territoriales que aportan el contexto de las dimensiones e indicadores seleccionados para evaluar los recursos inventariados, en este capítulo se procederá a formalizar el modelo metodológico para la evaluación de las minas, yacimientos e indicios minerales presentes en la Comunidad Autónoma de Aragón. Este modelo valorará la potencialidad de los diferentes puntos inventariados, entendiendo este concepto como el interés teórico para continuar con una explotación minera ya activa, la apertura de una nueva labor extractiva ligada a un determinado yacimiento, o el estudio y exploración de cada indicio mineral. Así, por ejemplo, si un yacimiento mineral no explotado viene clasificado con una potencialidad alta, esto indicará que las características del propio yacimiento, del o de los elementos que allí podrían ser explotados y las peculiaridades ambientales y socioeconómicas del medio en el que se ubica le confieren un interés elevado para desarrollar sobre él una actividad extractiva. Por el contrario, que un indicio fuera clasificado como poseedor de una baja potencialidad podría disuadir la realización de estudios de exploración que amplíen los conocimientos referentes a la presencia del elemento mineral en una determinada localización. En el caso opuesto, podría fomentarse el estudio de un indicio mineral si el valor estratégico del elemento mineral y las características ambientales y socioeconómicas del territorio donde se localiza indicaran un interés elevado.

En cualquier caso, que un yacimiento sea clasificado por sus características dentro del grupo de interés más bajo no supondrá que esa mineralización sea directamente descartable, sino que el rendimiento económico que ofrecería podría ser más reducido que el de aquellos clasificados en las categorías superiores. Esto podría deberse tanto al escaso valor estratégico del elemento extraído o a unas pobres características geológicas del yacimiento en el que se encuentra, como al desembolso económico que supondría adecuar el entorno del yacimiento adoptando algunas de las medidas correctoras o mitigadoras mencionadas en la revisión bibliográfica del Capítulo II, en aquellas áreas en las que las características territoriales y socioeconómicas no sean las más adecuadas.

#### 4.1. INTRODUCCIÓN: ANÁLISIS MULTICRITERIO EN GEOLOGÍA. PRINCIPIOS Y APLICACIONES

Como pudo ser comprobado durante el repaso bibliográfico aportado en el Capítulo II de la tesis, la minería es un fenómeno complejo y multifacético en el que interaccionan numerosas dimensiones. En ellas se incluyen los aspectos de tipo geológico, ingenieril, económico, estratégico, medioambiental, territorial, hidrogeológico, social y económico relacionados con la actividad minera. Para realizar la caracterización de los puntos incorporados en la base de datos que representan explotaciones, yacimientos o indicios mineros, estos fueron sometidos a un análisis multicriterio sencillo. Se escogió este método porque permite analizar en su conjunto las diferentes realidades que conviven en una labor de tipo extractivo.

El análisis multicriterio para la toma de decisiones es un elemento ampliamente difundido en diversas ciencias como la ingeniería, la geología y, especialmente, la ordenación del territorio. Sirvan como ejemplos las siguientes publicaciones en las que, de una u otra forma, se empleó un análisis multicriterio para la resolución de un problema de tipo espacial: *“Algunas aportaciones de la investigación operativa a los problemas de localización”* (Carrizosa, 2005), *“Aplicación de métodos de decisión multicriterio discretos al análisis de alternativas en estudios informativos de infraestructuras de transporte”* (Muñoz y Romana, 2016) o *“Propuesta de metodología Geomática basada en evaluación multicriterio para el trazado de ductos petroleros”* (Ordóñez, Quentin, y Cabrera, 2015).

Sin embargo, una de las publicaciones que mejor se relacionan con el objetivo que suscitó la planificación del análisis multicriterio efectuado en esta tesis se corresponde con el artículo de Lamelas García (2018): *“Aplicación de técnicas de análisis multicriterio a la localización óptima de extracciones de arenas y gravas en el entorno de Zaragoza”*. En él, la autora pretende realizar la selección de las localizaciones óptimas para la extracción de productos de cantera en el entorno de la capital aragonesa, usando para ello diferentes versiones del análisis multicriterio, como la metodología SAW o la metodología PROMETHEE-2, mucho más complejas de la empleada en esta tesis. Los criterios de valoración utilizados por Lamelas García incluyen la proximidad a zonas protegidas, la protección de las aguas

subterráneas, la capacidad agrícola de los suelos, la distancia a carreteras y a núcleos urbanos, la posición del nivel freático o la localización del recurso, entre otros.

En una sociedad como la actual, y siguiendo la legislación europea que exige un desarrollo bien proyectado y sostenible, el diseño y la planificación de actividades que supongan un impacto en el medio natural y humano debe realizarse siguiendo los paradigmas de la sostenibilidad, que como se comprobó en el Capítulo II, no solo suponen la optimización de los recursos y la mejor integración paisajística, sino que también buscan producir unos menores costes sociales y ambientales (Lamelas García, 2018; Muñoz y Romana, 2016). De este modo, los implicados en la toma de decisiones deben seleccionar de entre todas las opciones posibles (Muñoz y Romana, 2016) la alternativa óptima para la puesta en marcha de una determinada actividad, que integre factores socioeconómicos y medioambientales. Los análisis multicriterio permiten conjugar todos estos factores en un modelo que Thierauf y Grosse (1974) consideran una representación o abstracción de una situación real, y que muestra las relaciones y las interrelaciones de la acción y la reacción en términos de causa y efecto (Flores Gamboa y Leyva López, 2015). Para ello se sirven de modelos simbólicos o matemáticos que actúan como verdaderas representaciones de la realidad (Flores Gamboa y Leyva López, 2015).

Según Hillier y Lieberman (2010) la elaboración de este modelo de síntesis consta de diversas fases, entre la que se incluyen la observación cuidadosa y la formulación del problema -fase que incluye la recolección de la información pertinente- y la creación del propio modelo científico a través del cual se pretende abstraer la esencia del problema real (Flores Gamboa y Leyva López, 2015). Este modelo está configurado por tres componentes fundamentales (Muñoz y Romana, 2016):

1. Los **criterios de decisión**, que son los elementos de referencia en base a los que se ejecuta la decisión.
2. Los **pesos asignados** a los criterios, que permiten cuantificar la importancia relativa otorgada a los criterios de decisión.
3. Las **alternativas**, que se corresponden con el conjunto finito de soluciones posibles que deberán ser analizadas mediante la ejecución del análisis.

## 4.2. ELEMENTOS DEL ANÁLISIS MULTICRITERIO

Tras lo expuesto en el apartado anterior, en el análisis generado para la valoración del potencial minero de los recursos que componen la base de datos se generó un modelo matemático que sintetizara la realidad del problema a través de tres dimensiones fundamentales del sector minero. Estas tres dimensiones están relacionadas tanto con las propiedades intrínsecas del yacimiento o del elemento explotado, como con las características del territorio en el que se ubica y las posibles interacciones con la población y con los intereses ambientales, sociales y económicos. Estas tres dimensiones, que tratan de dar respuesta a las preguntas planteadas en el apartado final del segundo capítulo de la tesis, reciben los siguientes nombres genéricos:

- **Perfil geológico:** que trata de responder a la pregunta de si el yacimiento presenta un interés económico y estratégico suficiente, mediante el análisis de las propiedades intrínsecas del yacimiento y del valor crítico del elemento en él contenido.
- **Aptitud del terreno:** creada para analizar la adecuación del territorio donde se ubica el yacimiento para soportar el desarrollo de una actividad extractiva. Analiza cuál será la respuesta del medio ante los impactos generados por las labores extractivas y la posible implantación de medidas correctoras.
- **Inserción socioeconómica:** estudia la interacción de una potencial explotación minera sobre un yacimiento o indicio mineral inventariado con el ser humano y sus intereses económicos, sociales y ambientales. Es decir, valora lo que hay en el territorio y cómo se relaciona con la explotación minera.

Para evaluar el comportamiento de cada elemento del inventario en las diferentes dimensiones propuestas se han establecido una serie de indicadores, cuyo objetivo es valorar diversos aspectos de dicha dimensión. Estos indicadores se corresponden con los criterios de decisión, juzgados como un componente esencial de los análisis multicriterio. En ocasiones, el límite que marca la pertenencia de un indicador a una u otra dimensión es muy sutil, especialmente entre los que analizan el territorio, pudiendo encontrar motivos para su inclusión en los dos grupos. Finalmente, se decidió que si el indicador influía en los

elementos presentes sobre el terreno donde se asienta el yacimiento, sean estos elementos biológicos o humanos, se incluirían en la dimensión socioeconómica.

Entrando ya propiamente en el modelo metodológico elaborado, cabe destacar, en primer lugar, que los diversos indicadores que componen cada una de las tres grandes dimensiones analizadas fueron ponderados en función de su incidencia y/o relevancia, así como en base a la calidad de los datos disponibles para su valoración. Esta ponderación se corresponde con el segundo elemento fundamental del análisis multicriterio, es decir, con el peso otorgado a los diferentes criterios de decisión, que permiten cuantificar la importancia relativa otorgada a los criterios de decisión. Dicha valoración será analizada pormenorizadamente en los apartados correspondientes. No obstante, puede adelantarse que los pesos otorgados a cada uno de los indicadores que componen las dimensiones propuestas serán diferentes en función del tipo de recurso analizado.

La elección de los valores de entrada como parámetros del análisis multicriterio no es siempre sencilla (Lamelas García, 2018) y, en muchos casos, depende de la visión subjetiva del planificador. Cabe destacar que los pesos otorgados a los indicadores empleados en esta tesis se desprenden de la revisión bibliográfica efectuada en el Capítulo II. Esta ponderación deriva de un análisis profundo de la información recopilada, y fue establecida, dentro de cada dimensión, mediante la comparación por pares de alternativas, determinando su peso relativo en función de su importancia dentro del contexto minero y de los datos disponibles. No obstante, la forma de ponderar los criterios que participan en el análisis fue revisada con diversos expertos en el tema, como los técnicos geólogos de la Dirección General de Energía y Minas del Gobierno de Aragón.

El tercer elemento fundamental de un análisis multicriterio son las alternativas, que Muñoz y Romana (2016) definían como el conjunto de posibles soluciones que deben ser analizadas. En nuestro caso, este elemento se corresponde con los registros incorporados en la base de datos representando explotaciones, yacimientos, indicios de diferentes tipos de recursos. Como se ha comentado previamente, el análisis será específico para algunas de las categorías establecidas en la revisión de la base de datos aportada en el Capítulo III, en función de las características que presenta su extracción minera. De este modo, el peso

otorgado a los indicadores para el estudio de los minerales metálicos y los recursos energéticos fue similar, debido al problema que supone el drenaje ácido de minas en la explotación de este tipo de recursos. Otra gran categoría es la compuesta por las *rocas industriales*, los *minerales industriales* y las *rocas ornamentales*, cuya valoración con respecto del anterior grupo será diversa, exclusivamente, en la dimensión Aptitud del terreno. Las *aguas*, que componen la tercera categoría de valoración, serán evaluadas de un modo muy diferente al resto de grupos en las tres dimensiones consideradas. Debido a la diversa naturaleza del recurso, en el *Perfil geológico* tan solo será empleado un indicador. Además, por su carácter renovable, la forma de valorar algunos de los criterios que analizan las otras dos dimensiones también será diferente. Por último, las muestras tomadas en el campo para la evaluación de algunas formaciones rocosas como rocas madre generadoras de hidrocarburos, y que configuran el grupo etiquetado como *hidrocarburos no convencionales*, a pesar de tratarse de recursos energéticos cuya valoración en las dimensiones *Aptitud del terreno* e *Inserción socioeconómica* será similar al de estos, por la diversa procedencia de los registros incorporados al inventario serán evaluados de una forma diversa en la dimensión *Perfil geológico*. Este grupo de recursos tendrán un indicador específico en esta dimensión.

Por otro lado, en los indicadores que componen cada una de las dimensiones se han establecido a su vez una serie de categorías (cinco en prácticamente todos los casos). Cada una de estas categorías representa un nivel de incidencia del indicador que se expresa mediante la asignación de un peso, cuyo valor será empleado en los cálculos posteriores. Es fundamental definir si un el incremento en cada uno de los criterios empleados supone un aumento o un descenso en la idoneidad del registro analizado (Lamelas García, 2018). La puntuación más alta, 5, será otorgada a las categorías más favorables para el desarrollo de la actividad minera, mientras que aquellas clases con características menos adecuadas para el desarrollo de labores extractivas serán puntuadas con un 1.

En los apartados posteriores serán analizados, dimensión por dimensión, todos los indicadores empleados en el análisis, así como las categorías que los componen y los pesos relativos asignados a cada uno de estos indicadores.

### 4.3. PERFIL GEOLÓGICO

El análisis de esta dimensión es el más sencillo de los tres propuestos ya que los indicadores encargados de evaluar el perfil geológico de los yacimientos e indicios minerales no requieren de análisis espaciales o estadísticos complejos.

Tabla 4.1. Indicadores de la dimensión Perfil Geológico. Elaboración propia.

INDICADOR	PESO C.1 <sup>7</sup>	PESO C.2 <sup>8</sup>	PESO C.3 <sup>9</sup>	PESO C.4 <sup>10</sup>	CATEGORÍA	PESO
ACTIVIDAD	0,35	0,35	1	-	En explotación	5
					Con derechos otorgados o en tramitación	4
					Potencialmente recuperable	3
					Indicios minerales	2
					Descartados	1
TAMAÑO	0,3	0,3	0	-	Grande	5
					Mediano	3
					Pequeño	1
FORMA DE APARICIÓN	0,1	0,1	0	-	Principal	5
					Asociado	2
RECURSOS MINERALES ASOCIADOS	0,05	0,05	0	-	Algún elemento crítico asociado	5
					Varios elementos asociados de importancia media y/o baja	4
					Un elemento asociado de importancia media o varios de importancia baja	3
					Un elemento asociado de importancia baja	2
					Ningún elemento asociado	1
VALOR ESTRATÉGICO	0,2	0,2	0	-	Muy alto (elementos críticos)	5
					Alto (importancia económica o riesgo en el suministro muy alto)	4
					Medio (importancia económica alta)	3
					Bajo (importancia económica o riesgo en el suministro medio)	2
					Muy bajo (importancia económica o riesgo en el suministro bajo)	1
ANÁLISIS DEL TOC: CONTENIDO EN CARBONO ORGÁNICO	-	-	-	1	Muy bajo (no generadora)	1
					Bajo (pobre)	2
					Medio (regular)	3
					Alto (buena)	4
					Muy alto (muy buena)	5

<sup>7</sup> Minerales Metálicos y Recursos Energéticos

<sup>8</sup> Rocas Industriales, Minerales Industriales y Rocas Ornamentales

<sup>9</sup> Aguas

<sup>10</sup> Hidrocarburos no convencionales

La Tabla 4.1. recoge todos los indicadores empleados en el análisis de esta dimensión del yacimiento, incluyendo el peso específico asignado y las categorías en las que se subdividen. Los indicadores denominados *Tamaño* y *Forma de Aparición* son los únicos, de entre todos los empleados en las tres dimensiones estudiadas, que no constan de cinco categorías. En el caso de la forma de aparición del elemento no se puede hacer una gradación sino que solo existen dos condiciones posibles: que el elemento sea el primordial en la mineralización o que aparezca ligado a otro mineral principal. Por otra parte, los yacimientos fueron clasificados exclusivamente en tres categorías en función de su tamaño.

Los indicadores más valorados en esta dimensión son el estado de actividad en el que se encuentra el yacimiento y su tamaño. El primero de ellos hace referencia, en un cierto sentido, a la seguridad de que efectivamente exista una mineralización ligada a ese punto del inventario, mientras que las reservas estimadas es uno de los criterios primordiales a la hora de promover la puesta en marcha de una actividad minera. Por otra parte, tal y como se analizó en el Capítulo II de la tesis, la creciente competencia global por el acceso a los mercados mundiales de materias primas puede hacer que las naciones vuelvan la mirada hacia sus propios territorios para poder obtenerlas, es por esto por lo que el indicador referente al valor estratégico del elemento explotable en el yacimiento ha recibido una puntuación relativamente alta. Los dos indicadores menos valorados serán la forma de aparición y los recursos minerales asociados, especialmente este último, al tratarse de un factor complementario que puede aumentar el interés de explotar un yacimiento, pero no será un factor determinante por sí mismo.

En el caso de las *aguas*, al no ser aplicables algunos de los indicadores empleados, o debido a la falta de información referente a otros, como el volumen de los acuíferos que nutren las explotaciones, el único indicador que será valorado coincidirá con el que estudia el estado de actividad. Del mismo modo, el grupo denominado *hidrocarburos no convencionales*, por la distinta naturaleza de los elementos registrados, van a ser valorados en esta dimensión mediante un único indicador basado en los resultados del análisis TOC.

#### 4.3.1. Actividad

Este indicador analiza el estado de actividad en el que se encuentra el yacimiento en el momento actual, así como su evolución histórica. En concreto se diferenciaron 5 categorías en función de la situación presente en la que se encuentra el recurso: *en explotación, con derechos otorgados o en tramitación, potencialmente recuperables, indicios y descartados*.

El listado de explotaciones activas por provincia y sección minera fue facilitado por los técnicos geólogos del Gobierno de Aragón, como parte de la colaboración y apoyo documental e informativo derivado de la firma del Convenio “Desarrollo de Actividades de Investigación en el sector energético y minero de Aragón”. El resto de puntos inventariados y su estado de actividad proceden de diversas fuentes, analizadas en el Capítulo III de la tesis durante la revisión de la metodología para la creación de la base de datos.

Dentro de la categoría denominada *Con derechos otorgados o en tramitación* se incluyeron todos aquellos yacimientos cuya incorporación al inventario vino derivada de su inclusión en el Catastro Minero, estando recogidos en el mismo como derechos mineros a los que se les han otorgado permisos de explotación o de investigación. Incluye, por tanto, todos aquellos registros que potencialmente podrían ser puestos en explotación en un futuro próximo.

Los yacimientos que fueron explotados en épocas pasadas y en los que en la actualidad no existe ninguna actividad extractiva ligada a ellos pertenecerán a la tercera categoría, es decir, a los *Potencialmente recuperables*. Dentro de este grupo se incluyen, entre otros elementos, minas y canteras activas (o ya históricas) en el momento en el que se ejecutó la primera edición de la Serie MAGNA del Mapa Geológico Nacional 1:50.000 (entre 1973 y 2003), actividades mineras procedentes de otras fuentes de información que se encontraban activas en aquel momento pero no en la actualidad, así como Derechos Mineros recogidos en el Catastro que posean una Concesión de Explotación caducada.

Por su parte, los *Indicios minerales* son manifestaciones u ocurrencias de un mineral o grupo de minerales en un territorio concreto (Junta de Andalucía, 2013), que precisan de

una etapa de exploración para determinar la presencia efectiva de dicho recurso, así como su distribución, dimensiones, pureza, tonelaje, etc.

Finalmente, los yacimientos o indicios minerales con Derechos Mineros de Exploración caducados o cancelados, es decir, aquellos que fueron sujeto de estudio y análisis pero para los que nunca se llegó a solicitar un permiso para comenzar la actividad extractiva, fueron agrupados dentro de la categoría etiquetada con el nombre de *Descartados*.

Tabla 4.2. Categorías del indicador que analiza el estado de actividad. Elaboración propia.

CATEGORÍA	PESO
En explotación	5
Con derechos otorgados o en tramitación	4
Potencialmente recuperable	3
Indicios minerales	2
Descartados	1

Como puede observarse en la Tabla 4.2., obtuvieron una puntuación máxima en este indicador aquellos yacimientos minerales sobre los que efectivamente se está desarrollando una actividad minera. La categoría situada inmediatamente por debajo recoge los derechos mineros otorgados por la autoridad competente y aquellos que han sido solicitados, por entender que existe información suficiente sobre la mineralización como para despertar un interés en las empresas dedicadas a este sector.

Por otra parte, las explotaciones mineras no siempre son abandonadas por agotamiento del recurso, sino que, en la mayoría de los casos un cambio en la situación del mercado del mineral extraído deja de hacer viable la explotación de un modo económico. Es por esto por lo que las minas y canteras históricas de la región fueron valoradas con un peso de 3, ya que es seguro que en esa ubicación hubo una mineralización lo suficientemente interesante desde el punto de vista económico y social para alimentar una actividad minera. Tal seguridad no se encuentra asociada a los indicios minerales, por lo que su valoración será más baja.

Finalmente, la categoría denominada con el nombre de yacimientos *descartados* fue la que recibió una valoración menor, ya que se asumió, por la naturaleza de los puntos

incorporados, que los estudios encaminados a la valoración de la viabilidad de estos yacimientos arrojaron resultados negativos.

Como puede observarse en la tabla (Tabla 4.1.), este indicador fue ponderado de forma diversa para los distintos grupos de recursos analizados. Como se ha explicado previamente será el único indicador valorado en esta dimensión para el grupo de las *aguas*, por lo que el peso otorgado será el máximo. Por otra parte, todos los registros relativos a los *hidrocarburos no convencionales* han sido incluidos dentro de la categoría correspondiente a los indicios, de modo que, en este caso, este indicador no será relevante. Para el resto de las categorías de recursos el peso otorgado a este indicador será similar (suponiendo un 35% del valor total de la dimensión *Perfil geológico*).

#### 4.3.2. Tamaño

En minería, los recursos minerales que se encuentran presentes en los yacimientos se nombran con el término de reservas minerales (Wotruba, Hentschel, Hruschka, y Priester, 2000). La cantidad de reservas existentes en el yacimiento, así como su calidad, son parámetros relacionados con la geología del yacimiento, y fundamentales en la determinación de la viabilidad de la explotación minera.

El proceso que establece de forma numérica los principales parámetros de la explotación, es decir, el tonelaje (o volumen), la ley media, la ley de corte y el valor económico de las reservas presentes en el yacimiento se denomina cubicación de reservas (Higuera, s. f.). La cubicación minera, definida como la estimación de las reservas de un yacimiento (Oyarzún y Oyarzun, 2014) es un proceso complejo que se realiza durante la fase de evaluación. El estudio de las reservas de un yacimiento puede realizarse empleando diversos métodos, que se agrupan en dos categorías principales: los métodos clásicos o geométricos y los métodos geoestadísticos (Cazal y Betzabé Piña, 2015). Estos métodos, extrapolan los datos puntuales disponibles, procedentes de los sondeos realizados, a datos areales, multiplicando por la potencia para obtener el volumen del cuerpo mineralizado. Este volumen será, a su vez, ponderado en función de los datos referentes a la concentración o ley del metal en el yacimiento para obtener el tonelaje del mineral o elemento de interés en el yacimiento

(Higuera, s. f.). La estimación de las reservas de un yacimiento es un proceso muy complejo, además de ser costoso desde el punto de vista económico.

A falta de datos específicos para cada elemento inventariado sobre aspectos como su volumen o ley, en este indicador, los yacimientos registrados fueron divididos en función de su tamaño según datos procedentes de las propias fuentes. Estas fuentes no aportan ningún tipo de información adicional sobre los límites de volumen o de tonelaje empleados para establecer las categorías, limitándose a distinguir las reservas en grandes, medianas y pequeñas.

Solo dos fuentes de entre todas las consultadas presentaban información directa sobre el tamaño de los yacimientos minerales utilizando esta categorización. Dichas fuentes se corresponden con el servicio *WMS* referente a la *Base de datos de Metalogenia* del IGME y los informes que acompañan a la serie de Mapas de Rocas y Minerales Industriales de Aragón, publicados por el IGME y el Gobierno de Aragón. Ante la imposibilidad de obtener datos fiables sobre el tamaño real del resto de yacimientos minerales, se optó por transvasar la mayor parte de ellos a la categoría más baja, a no ser que otros yacimientos del mismo elemento localizados en las proximidades hicieran pensar lo contrario.

De esta forma, los yacimientos fueron divididos según su tamaño en *grandes, medianos y pequeños* (Tabla 4.3.), cuyo peso otorgado será progresivamente descendente.

Tabla 4.3. Categorías del indicador tamaño. Elaboración propia.

CATEGORÍA	PESO
Grande	5
Mediano	3
Pequeño	1

Este indicador, así como todos los restantes dentro de esta dimensión (con la única excepción del referente al análisis del TOC), serán ponderados con un peso similar para todos los grupos de recursos, excepto los correspondientes a las *aguas* y a los *hidrocarburos no convencionales*.

### 4.3.3. Forma de aparición del mineral en el yacimiento

Los procesos geológicos responsables de la concentración en algunos puntos concretos de la corteza terrestre de ciertos elementos químicos, tienden a agruparlos según sus afinidades geoquímicas. Estos procesos pueden crear, así, asociaciones de diferentes minerales en los yacimientos, algunos de ellos más abundantes, a los que denominaremos principales, y otros menos frecuentes o asociados. Si en un yacimiento se explota un único mineral o elemento, la mena se denomina simple, pero si se extrae más de un mineral principal, esta recibirá el calificativo de compuesta. Ligados a la mena principal pueden existir otros minerales o elementos, que si bien presentan un interés económico, no son el objetivo de la explotación, pero aumentan el valor económico de la producción (Higuera, s. f.). En algunas ocasiones, estos minerales o elementos asociados contribuyen, o incluso son determinantes, en la explotación del yacimiento, y pueden llegar a convertirse, en determinadas épocas, en recursos más valiosos que la propia mena.

En la tesis tratada, la diferenciación entre si el registro incorporado en la base de datos se corresponde con el elemento principal de la mineralización o se trata de un elemento asociado procede de las propias fuentes de información consultadas para la realización de la geobase de datos. En el caso de que no existiera ninguna mención al carácter principal o secundario del elemento en el yacimiento se asumió que se trata del mineral más importante de la mineralización.

*Tabla 4.4. Categorías del indicador referente a la forma de aparición del mineral en el yacimiento. Elaboración propia.*

CATEGORÍA	PESO
Principal	5
Asociado	2

Así, este indicador distinguió los puntos inventariados en función de si el elemento recogido en la base de datos era el recurso principal dentro de la mineralización a la que pertenecía, en cuyo caso recibió la puntuación máxima (Tabla 4.4.), o si por el contrario se trata de un elemento asociado a dicha mineralización.

#### 4.3.4. Recursos minerales asociados

En relación con el indicador anterior, los minerales asociados, si presentan interés en sus aplicaciones, pueden aumentar el beneficio económico de la explotación y hacerla más atractiva para las empresas mineras. Prácticamente todas las fuentes consultadas en el proceso de la elaboración de la base de datos geográfica proporcionaban información sobre los recursos minerales asociados. Sin embargo, y para optimizar los resultados incluyendo aquellos yacimientos e indicios minerales que podrían ser explotados simultáneamente aprovechando su colindancia, se llevó a cabo un análisis de proximidad, en el que incluyeron como elementos asociados todos aquellos puntos del inventario referentes a yacimientos e indicios minerales de naturaleza diversa a la del elemento en cuestión, localizados a una distancia menor de 300 metros.

Además, este indicador valoraba no solo la posibilidad de extraer más de un elemento o mineral en la misma explotación minera, sino también el mayor o menor valor estratégico de los mismos. Para determinar el carácter crítico del conjunto de elementos asociados a cada yacimiento se consultó la tabla propuesta en el indicador que será analizado inmediatamente después de este, correspondiente al Valor estratégico del elemento explotable (Tabla 4.6.). De este modo, los elementos pertenecientes a las categorías estimadas en dicho indicador con los valores de 3 y 4, han fueron agrupados con la etiqueta genérica de importancia media, mientras que los minerales catalogados en las dos categorías de menor peso pasaron a formar en este indicador de una clase denominada importancia baja.

El valor final que recibirá un yacimiento en este indicador dependerá, por tanto, del número de elementos asociados y de valor estratégico de los mismos, como puede ser observado en la Tabla 4.5.

*Tabla 4.5. Categorías del indicador que analiza los recursos minerales asociados. Elaboración propia.*

CATEGORÍA	PESO
Algún elemento crítico asociado	5
Varios elementos asociados de importancia media y/o baja	4
Un elemento asociado de importancia media o varios de importancia baja	3
Un elemento asociado de importancia baja	2
Ningún elemento asociado	1

Así, si en una mineralización aparecía, por ejemplo, magnesio como elemento asociado, ese punto inventariado recibió el valor máximo en este indicador, puesto que en dicho

yacimiento existía un elemento catalogado como *crítico*. Si por el contrario el elemento asociado a la mineralización analizada es el níquel, que según la nueva clasificación genérica es incorporado al grupo de *importancia media*, el punto analizado en este indicador pertenecerá a la categoría valorada con un peso de 3.

#### 4.3.5. Valor estratégico del elemento explotable

Como se pudo comprobar en el segundo capítulo de la tesis, todos los recursos minerales son importantes para la economía de un determinado país o región, al tratarse de materias primas indispensables en muchos sectores industriales que generan empleo y un alto valor añadido (Comisión Europea, 2017b) a la economía. Sin embargo, no todos los recursos minerales son igual de importantes para la industria, el desarrollo tecnológico, la defensa y el bienestar de una sociedad. A lo largo de la historia, diferentes desarrollos tecnológicos basados en ciertos minerales han hecho que las civilizaciones contemporáneas fueran dependientes de ese determinado elemento (Regueiro y González Barros, 2014a), aunque la evolución tecnológica implica que estos minerales especialmente importantes hayan cambiado con el devenir del tiempo. Este tipo de materiales, indispensables para el desarrollo de las sociedades reciben en la actualidad, y siguiendo la terminología de la UE, el nombre de Minerales Críticos o Fundamentales.

Todos los países y regiones del mundo dependen de una serie de materias primas para mantener su industria, su seguridad y el bienestar de sus habitantes. Estas materias primas, en su mayoría minerales, cruciales para la economía e indispensables para el desarrollo de las sociedades son catalogadas como estratégicas o críticas. Como se expuso en el apartado correspondiente dentro del marco teórico, España, como país, no ha desarrollado ningún estudio independiente que proclame un listado de elementos minerales especialmente relevantes para salvaguardar la seguridad y la economía nacional. Por otra parte, la Unión Europea, como institución, dentro de la Iniciativa de Materias Primas sí que ha realizado varios análisis de materias primas para determinar la criticidad de las mismas, según dos dimensiones fundamentales: su importancia económica y el riesgo existente en el suministro. Una materia prima será considerada como crítica, según criterios de la UE, cuando supere el umbral establecido como límite en ambas dimensiones.

En este proyecto, para determinar el carácter estratégico de los elementos minerales presentes en la C.A. de Aragón, se ha empleado la información sobre la situación más o menos crítica de los recursos minerales derivada de los estudios llevados a cabo por la Unión Europea. En concreto, la información básica empleada en nuestro análisis ha sido el gráfico biaxial en el que se representa la distribución de todas las materias primas analizadas por la UE en función de su Importancia Económica y el Riesgo en el Suministro.

A partir de esta información básica, se decidió proceder con la subdivisión del gráfico en una serie de áreas a las que les fue otorgado un peso específico, y que se corresponderán con las categorías que conforman este indicador (Figura 4.1). Los elementos considerados como críticos por la Unión Europea fueron asignados a la categoría con un peso mayor. El resto de componentes fueron enviados a las diferentes categorías en función de su importancia económica y el riesgo de que se produzcan interrupciones en su suministro. Así, por ejemplo, los yacimientos de manganeso, elemento para el que la UE no considera que exista un riesgo en el suministro muy elevado, pero su importancia económica supera con creces el umbral establecido, recibió un valor de 4 en este indicador, correspondiente a la categoría situada inmediatamente por debajo de la de los elementos críticos.

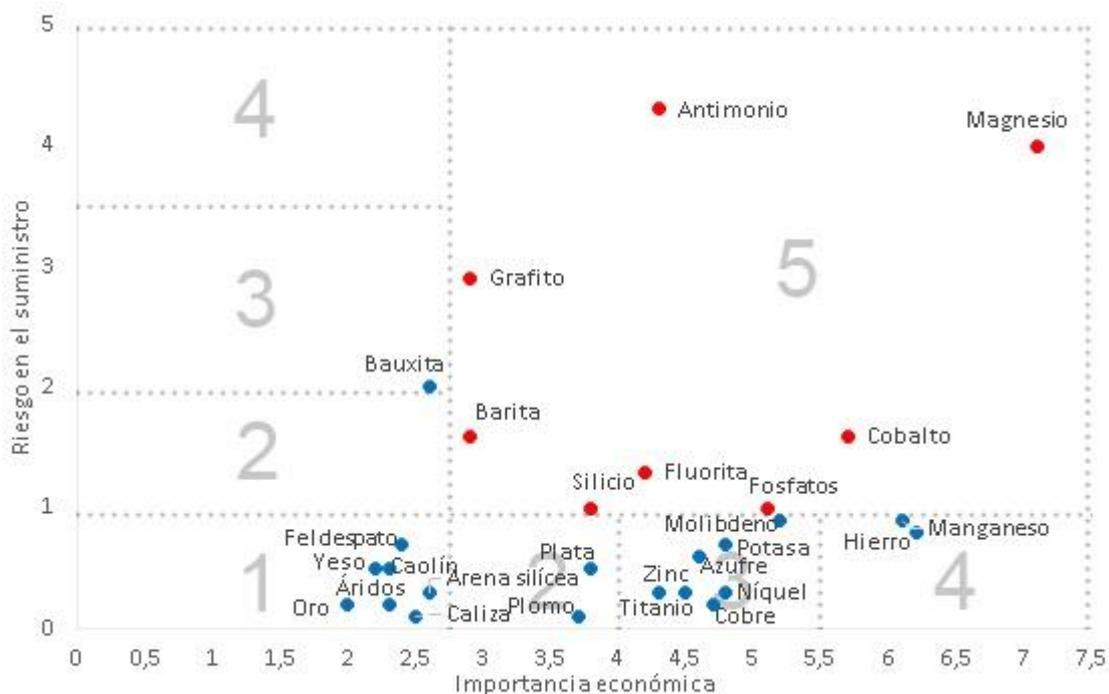


Figura 4.1. División del gráfico biaxial en las categorías empleadas en este proyecto. Elaboración propia a partir de los datos empleados por la Unión Europea en el Study on the review of the list of Critical Raw Materials (2017).

La denominación de las cinco clases establecidas para este indicador y sus correspondientes pesos vienen recogidos en la Tabla 4.6. La categoría referente a los elementos críticos incorpora recursos que superan los umbrales marcados en ambas dimensiones, mientras que, por el contrario, los recursos minerales que no sobrepasan los límites establecidos por la UE en ninguna de las dos variables estudiadas, pertenecerán a la categoría más baja. En las otras tres clases propuestas, sólo uno de los umbrales será superado, lo que condiciona la nomenclatura empleada. Así, por ejemplo, la categoría valorada con un peso de 4, recibe el nombre de “Importancia económica o riesgo en el suministro muy alto”, lo que significa que albergará elementos de importancia económica muy alta y bajo riesgo en el suministro, o viceversa, con un riesgo muy alto en el suministro pero una importancia económica inferior al umbral establecido.

Tabla 4.6. Categorías del indicador referente al valor estratégico. Elaboración propia.

CATEGORÍAS	PESO
Muy alto (elementos críticos)	5
Alto (importancia económica o riesgo en el suministro muy alto)	4
Medio (importancia económica o riesgo en el suministro alto)	3
Bajo (importancia económica o riesgo en el suministro medio)	2
Muy bajo (importancia económica y riesgo en el suministro bajo)	1

Aquellos recursos minerales no analizados por la Comisión de la Materias Primas de la UE, pero presentes en la C.A. de Aragón, fueron asignados a la categoría más baja, ya que se supuso que si no habían sido incorporados al informe es porque no mostraban una situación preocupante en ninguna de las dos dimensiones que componen dicho análisis. En la Tabla 4.7. se muestran los recursos minerales pertenecientes a las categorías valoradas con pesos específicos comprendidos entre 2 y 5.

Tabla 4.7. Elementos y minerales detectados en la Comunidad Autónoma aragonesa que superan los umbrales establecidos por la UE en alguno de los dos criterios empleados en el estudio de los materiales críticos, agrupados en función de la categoría a la que fueron asignados en este indicador. Elaboración propia.

Elementos críticos (5)	I.E. o R.S. muy alto(4)	I.E. o R.S. alto (3)	I.E. o R.S. medio (2)
Antimonio	Aluminita	Azufre	Plata
Barita	Hierro	Bauxita	Plomo
Cobalto	Manganeso	Cobre	
Espato-Flúor		Molibdeno	
Fósforo		Níquel	
Grafito		Potasas	
Magnesio		Sales potásicas	
Sílice		Titanio	
		Zinc	

Para concluir con la explicación de este indicador, cabe destacar que todos los yacimientos o indicios del mismo elemento pertenecen a la misma categoría, y por tanto, han recibido un peso idéntico, puesto que es el único de entre todos los empleados para analizar el perfil geológico que no dependerá exclusivamente de las características del propio yacimiento sino del elemento explotable en cuestión.

#### 4.3.6. Análisis del TOC: contenido en carbono orgánico

Este indicador es exclusivo de la categoría de recursos correspondiente a los *hidrocarburos no convencionales* (englobada dentro de los *recursos energéticos*), puesto que no es aplicable al resto de recursos. Además, fue el único indicador empleado en la

valoración de la dimensión *Perfil geológico* para este grupo de recursos, por un lado porque todas las muestras analizadas se corresponden con indicios, y por otro, por la dificultad en la adquisición de información determinante en el interés de la formación geológica, como su volumen y extensión lateral.

El valor que tomó cada punto inventariado en este indicador quedó determinado por el resultado obtenido en el análisis del *TOC*. Como se analizó en el Capítulo III (apartado 3.3.5.), el valor del *TOC* representa, en tanto por ciento en peso, el contenido en carbono orgánico de la muestra, tratándose de un parámetro importante para valorar la capacidad de las rocas para generar hidrocarburos. No obstante, el valor del *TOC* sirve, exclusivamente, para hacer una primera cuantificación de la riqueza orgánica, ya que solo indica la cantidad de materia orgánica contenida, pero no su calidad (Bennet et al., 2005).

Los expertos en geología del petróleo determinan unos umbrales que clasifican la calidad de la roca rica en materia orgánica para generar hidrocarburos en función de su contenido en carbono orgánico (Tabla 4.8.). Estos límites serán diversos dependiendo de la naturaleza de la roca, siendo más bajos, en términos generales, en las de tipo carbonatado.

*Tabla 4.8. Criterios de evaluación de las rocas generadoras. Basado en la clasificación propuesta por McCarthy (2011), (Bennet et al., 2005).*

Calidad de roca generadora	TOC en shales (%)	TOC en rocas carbonatadas (%)
No generadora	0 a 0,5	0 a 0,2
Pobre	0,5 a 1	0,2 a 0,5
Regular	1 a 2	0,5 a 1
Buena	2 a 5	1 a 2
Muy buena	> 5	> 2

Los umbrales plasmados en la tabla anterior fueron los empleados en la determinación de las categorías que conforman este indicador (Tabla 4.9.), asignando un valor más alto a aquellas rocas cuyo contenido en carbono orgánico fuera mayor.

*Tabla 4.9. Categorías del indicador referente al análisis del TOC. Elaboración propia.*

CATEGORÍA	PESO
Muy bajo (no generadora)	1
Bajo (pobre)	2
Medio (regular)	3
Alto (buena)	4
Muy alto (muy buena)	5

#### 4.4. APTITUD DEL TERRENO

Los indicadores propuestos en el análisis de esta dimensión están más relacionados con el territorio que con el propio yacimiento, al tomar en consideración las características del terreno donde se asientan. El objetivo es valorar las peculiaridades del área en la que se ubica cada yacimiento o indicio recogido en el inventario, intentando determinar si esta localización es la ideal para la práctica de la actividad minera.

Tabla 4.10. Indicadores empleados en la dimensión Aptitud del Terreno. Elaboración propia.

INDICADOR	PESO C.1 <sup>11</sup>	PESO C.2 <sup>12</sup>	PESO C.3 <sup>13</sup>	PESO C.4 <sup>14</sup>	CATEGORÍA	PESO
ADECUACIÓN TOPOGRÁFICA	0,2	0,2	0,2	0,2	Adecuación topográfica óptima	5
					Adecuación topográfica alta	4
					Adecuación topográfica media	3
					Adecuación topográfica baja	2
					Adecuación topográfica muy baja	1
CAPACIDAD RECARGA DE ACUÍFEROS	-	-	0,4	-	Capacidad de recarga muy alta	5
					Capacidad de recarga alta	4
					Capacidad de recarga media	3
					Capacidad de recarga baja	2
					Capacidad de recarga muy baja	1
GENERACIÓN Y DIFUSIÓN DAM Y OTROS TIPOS DE CONTAMINANTES	0,5	0,3	0,05	0,5	Potencial de generación y difusión DAM y otros tipos de contaminación más bajo	5
					Potencial de generación y difusión DAM y otros tipos de contaminación bajo	4
					Potencial de generación y difusión DAM y otros tipos de contaminación medio	3
					Potencial de generación y difusión DAM y otros tipos de contaminación alto	2
					Potencial de generación y difusión DAM y otros tipos de contaminación más alto	1
VULNERABILIDAD FRENTE A EVENTOS NATURALES EXTREMOS	0,3	0,5	0,35	0,3	Vulnerabilidad muy baja	5
					Vulnerabilidad baja	4
					Vulnerabilidad media	3
					Vulnerabilidad alta	2
					Vulnerabilidad muy alta	1

<sup>11</sup> Minerales Metálicos y Recursos Energéticos

<sup>12</sup> Rocas Industriales, Minerales Industriales y Rocas Ornamentales

<sup>13</sup> Aguas

<sup>14</sup> Hidrocarburos no convencionales

La ponderación de los indicadores empleados para los diferentes grupos de recursos que forman el inventario va a ser muy diversa (Tabla 4.10). Por un lado, los *minerales metálicos* y los *recursos energéticos*, son valorados de forma conjunta, por su capacidad para generar drenaje ácido de minas. Los *hidrocarburos no convencionales*, analizados de un modo diferente en la anterior dimensión, van a tener una valoración similar a los *recursos energéticos* tanto en la dimensión *Aptitud del terreno* como en la correspondiente a la *Inserción socioeconómica*. En el análisis de las *rocas y minerales industriales*, así como de las *rocas ornamentales*, no será otorgado un peso tan elevado al indicador que valora la generación del drenaje ácido de minas. Para este grupo de recursos, la vulnerabilidad frente a eventos naturales extremos será el indicador con un peso mayor. Por su parte, el grupo de las *aguas*, incluirá un indicador adicional, relacionado con la capacidad de recarga del acuífero que las nutre, valorado con el peso más elevado para esta categoría de recursos.

En los siguientes apartados se explicarán los procedimientos analíticos establecidos para tratar los diversos indicadores que se han utilizado en la valoración de esta dimensión.

#### 4.4.1. Adecuación topográfica

Como se deduce de las consideraciones expuestas en el tercer capítulo de la tesis, las labores extractivas se verán favorecidas por la localización del yacimiento en áreas llanas, sin pendientes pronunciadas y que no requieran de grandes modificaciones en su topografía para la realización de la actividad minera y para albergar las estructuras auxiliares necesarias para tal fin, incluidas las balsas y las escombreras. La estabilidad del frente de extracción también se verá beneficiado por la existencia de terrenos topográficamente más aplanados, así como el control de la dispersión de los efluvios líquidos y de la esorrentía de las aguas procedentes de la explotación minera.

De esta forma, una buena opción para determinar la adecuación del relieve en relación con la puesta en marcha de actividades humanas de tipo económico consiste en conocer la pendiente media de ese lugar. No obstante, se trata de un valor meramente orientativo, ya que, como se verá en el siguiente ejemplo (Figura 4.2.), una pendiente media más baja no siempre se corresponde con un terreno con unas características más adecuadas para su utilización como soporte de una actividad económica.

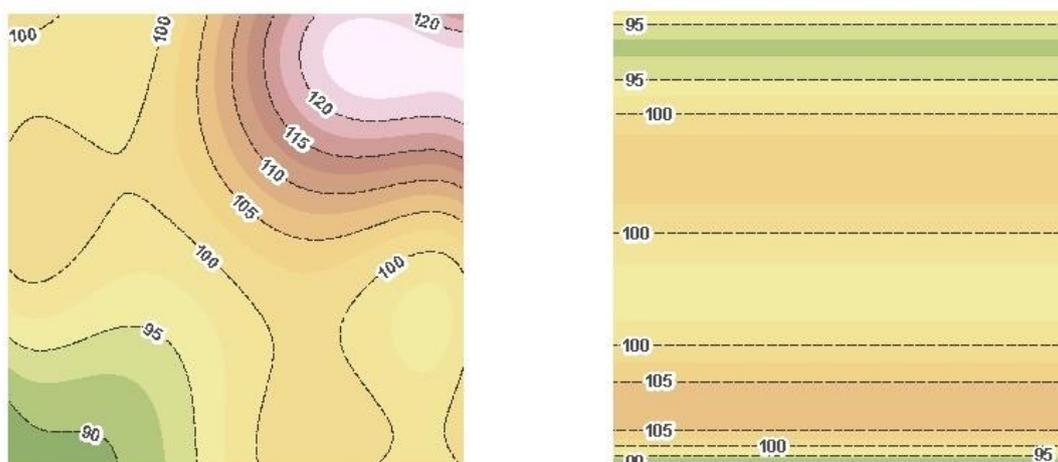


Figura 4.2. Representación mediante curvas de nivel de las dos superficies consideradas en el ejemplo. Elaboración propia.

En este ejemplo se muestran dos zonas diversas. La primera está caracterizada por poseer tres áreas relativamente llanas situadas en cotas diferentes (125 metros sobre el nivel del mar, 90 metros y una más extensa en torno a los 100 metros). Entre ellas existen pendientes moderadas. La segunda área, por su parte, se corresponde con una zona ondulada con cotas localizadas entre los 90 metros sobre el nivel del mar y los 110 metros.

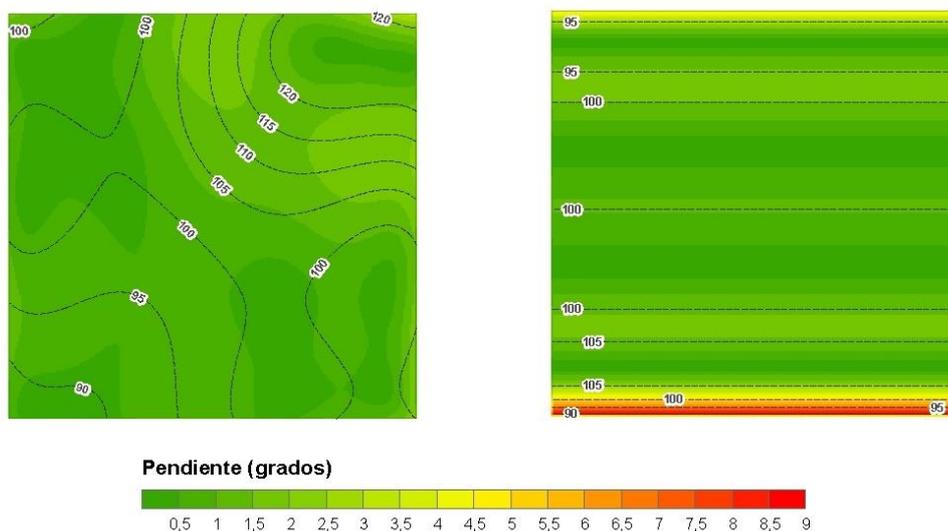
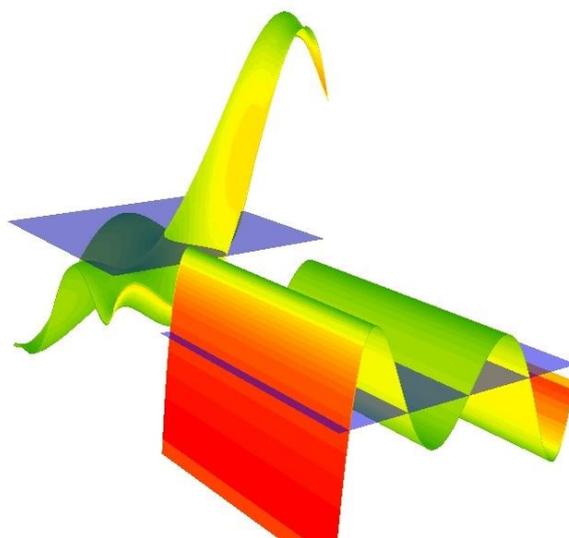


Figura 4.3. Mapa que representa la pendiente (en grados) de las dos áreas consideradas. Elaboración propia.

En lo que respecta a la pendiente, ambas zonas muestran valores que, según los rangos establecidos por los autores nombrados en el apartado III, podrían ser clasificadas entre horizontales y moderadas. La primera de las zonas presenta (Figura 4.3.) a lo largo de toda

su superficie pendientes menores a dos grados, lo que podría hacer pensar que se corresponde con un área sin grandes variaciones en su topografía. Por el contrario, la zona representada en la segunda figura muestra unos valores de pendiente más elevados en sus márgenes superiores e inferiores, llegando a alcanzar los 9°. No en vano, la pendiente media de la zona representada a la izquierda es de 0,81°, mientras que la de la situada a la derecha supera los 1,34°.

De este modo, y basado solamente en el valor de pendiente media de la región, podría considerarse que la primera de las áreas mostradas sería más adecuada para la ubicación de una actividad minera, cuando en la realidad presenta una gran amplitud de cotas altimétricas que dificultarían el acondicionamiento de las instalaciones y el desarrollo de las labores extractivas. Si se representa en tres dimensiones las dos zonas propuestas como ejemplo (Figura 4.4.) se puede observar la importancia que tiene el valor medio de la altura en la determinación de la zona más adecuada para el desarrollo de una actividad minera. La primera de las áreas propuestas, a pesar de poseer una pendiente media menor, presenta una topografía más escarpada, y por tanto, menos indicada para la construcción de infraestructuras y la realización de trabajos mineros. Puede observarse claramente la amplitud de cotas topográficas que presenta el territorio, con grandes diferencias entre el punto más alto, el más bajo y la altura media regional, aspectos ya resaltados en el apartado 3. En la segunda de las áreas que sirven como ejemplo, la diferencia entre estas cotas es mucho más reducida, a pesar de que la pendiente media sea mayor.



*Figura 4.4. Representación tridimensional de las áreas tomadas como ejemplo. Para la creación de la figura la componente vertical ha sido exagerada 100 veces con respecto a la componente horizontal. Elaboración propia.*

La primera de las áreas propuestas, a pesar de poseer una pendiente media menor, presenta una topografía más escarpada, y por tanto, menos indicada para la construcción de infraestructuras y la realización de trabajos mineros. Puede observarse claramente la amplitud de cotas topográficas que presenta el territorio, con grandes diferencias entre el punto más alto, el más bajo y la altura media regional, aspectos ya resaltados en el apartado 3. En la segunda de las áreas que sirven como ejemplo, la diferencia entre estas cotas es mucho más reducida, a pesar de que la pendiente media sea mayor.

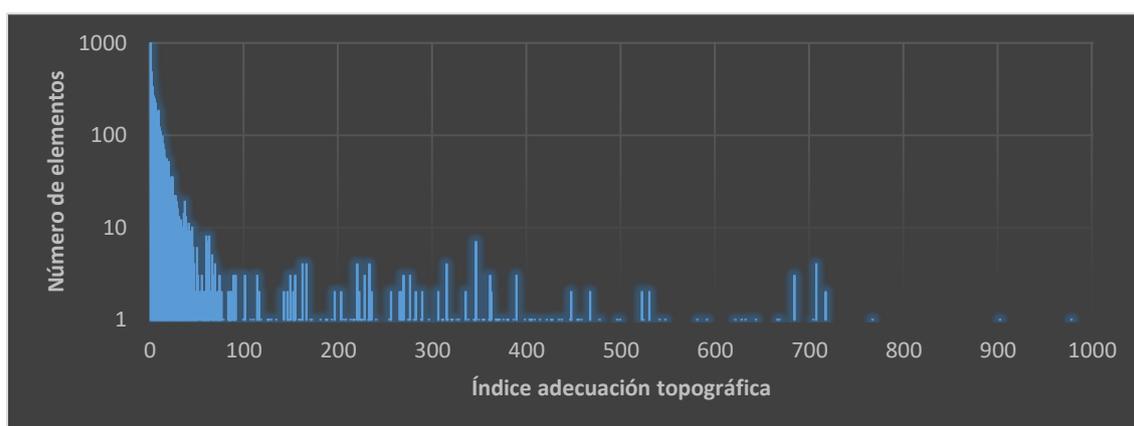
Para solventar esta incongruencia, y afinar así en la determinación de las áreas más adecuadas para el desarrollo de actividades mineras, se consideró emplear una fórmula matemática que no solo tenga en cuenta la pendiente media regional, sino también la amplitud de cotas del territorio:

$$\text{Índice adecuación topografía} = \frac{pen_{med} \cdot (Alt_{m\acute{a}x} - Alt_{med}) \cdot (Alt_{med} - Alt_{m\grave{i}n})}{10.000}$$

Donde  $Pen_{med}$  es la pendiente media de la zona,  $Alt_{m\acute{a}x}$  y  $Alt_{m\grave{i}n}$  el valor del punto más alto y del punto más bajo dentro del territorio y  $Alt_{med}$  la altura media de la región considerada. El hecho de que el valor obtenido se divida entre 10.000 se corresponde con una cuestión estética más que matemática, puesto que la diferencia de cotas con la altura media se sitúa en la mayoría de los casos en el orden de las centenas.

Las variables de la formula anterior correspondientes a la altura y la pendiente media y las cotas más altas y bajas dentro del territorio, están ligadas a las características del terreno en un radio de 1.300 metros en torno al punto del inventario analizado. Este radio de 1.300 metros fue elegido, como se explicó detalladamente en el Capítulo III de la tesis (apartado 3.2.3. *El tamaño de las explotaciones mineras y sus implicaciones metodológicas*), por ser el valor mínimo que abarca el perímetro de la práctica totalidad de explotaciones mineras activas en la región. El valor obtenido permitirá comparar la mayor o menor aptitud que presenta ese territorio según sus características altimétricas y de pendiente.

Una vez determinado el valor de este índice para todos los puntos que componen el inventario, se pudo observar que los resultados contemplan un rango numérico muy alto (Figura 4.5.), que van desde valores menores a la unidad, en la zona más llana de la depresión del Ebro, hasta cifras mayores a 900 en el área pirenaica.



*Figura 4.5. Histograma en el que se muestra la distribución de los resultados del índice de adecuación topográfica, incluyendo en cada intervalo unitario del indicador el número de elementos registrados. Elaboración propia.*

El histograma que representa el número de elementos incluidos en cada intervalo indica una clara concentración de los elementos en los valores más bajos, menores de 50 en su mayoría. De este modo, a la hora de establecer unas categorías basadas en la pendiente (Tabla 4.11.) que fueran equivalentes a las empleadas en el resto de indicadores, fue necesario tener en cuenta la distribución de los datos en el gráfico. Para ello, se siguieron criterios encaminados a conseguir que todos los grupos tuvieran un número de elementos no muy dispar, pero que a su vez reflejen las grandes diferencias que se pueden encontrar entre los resultados de este indicador.

Finalmente, aquellos puntos para los que el índice calculado fue más bajo recibieron el valor máximo para este criterio, mientras que a aquellas zonas con pendientes medias y desniveles más altos se les asignó el valor mínimo.

*Tabla 4.11. Categorías del indicador que analiza la adecuación topográfica. Elaboración propia.*

Categoría	Intervalo índice	Peso
Adecuación topográfica óptima	0 – 1	5
Adecuación topográfica alta	1 – 10	4
Adecuación topográfica media	10 – 50	3
Adecuación topográfica baja	50 – 100	2
Adecuación topográfica muy baja	Más de 100	1

#### 4.4.2. Capacidad de recarga de los acuíferos

Las aguas de precipitación, tanto en forma de lluvia como de nieve, son las responsables de la renovación y recarga de las masas de agua subterráneas. Dichas aguas sufren destinos diversos una vez alcanzan el suelo y solo una pequeña parte se infiltra en el subsuelo pasando a formar parte de las aguas subterráneas. Una vez infiltradas en el subsuelo, las aguas siguen flujos complejos que no están directamente dirigidos por la gravedad, sino por el potencial hidráulico, de forma que el agua fluirá desde los puntos en los que esta posee una mayor energía hacia aquellos en los que tiene una energía más baja. Estos flujos podrán ser verticales descendentes, verticales ascendentes o laterales, pudiendo recorrer grandes distancias.

Calcular las tasas de recarga de un acuífero será sumamente complicado, puesto que existen múltiples factores que intervienen en la infiltración de las aguas en el subsuelo. Además, la recarga de agua puede ser directa, por percolación vertical a partir de las precipitaciones, o indirecta, con aguas que pueden haber precipitado originalmente en áreas muy distantes geográficamente del acuífero en cuestión. Entre los factores que influyen en la recarga de acuíferos se distinguen las condiciones climáticas, la topografía, las características edáficas y litológicas del terreno, incluyendo la composición del suelo y la permeabilidad, la presencia o ausencia de vegetación y la densidad de raíces en el suelo. Batelaan y De Smedt (2007) desarrollaron un modelo complejo para calcular las tasas de recarga de diversos acuíferos localizados en la región belga de Flandes mediante el empleo de Sistemas de Información Geográfica. Para lograr este objetivo, en su metodología,

aplicaban una fórmula matemática que calculaba el balance hídrico de cada porción del terreno, usando como variables la precipitación recogida, los valores de interceptación, la escorrentía y la transpiración de las plantas. En el cálculo de cada una de estas variables tuvieron en cuenta numerosos condicionantes, entre los que se incluyen el tipo de vegetación, la textura del suelo, la pendiente o la profundidad de la superficie freática.

El modelo propuesto en este indicador para la determinación de la capacidad de recarga de los acuíferos aragoneses será una simplificación del desarrollado por Batelaan y De Smedt. Este indicador será aplicable solo al análisis de la categoría formada por los distintos tipos de aguas de los que se obtienen un beneficio en la región. Trata de ser una aproximación a la capacidad de recarga de las masas de agua subterráneas presentes en el territorio, que complete la valoración de las características que ofrece el medio para el uso de las aguas de manantial, termales, minerales y mineromedicinales explotadas en la región. Como se ha visto, en este proceso intervienen numerosos factores, algunos complejos de determinar, como la ubicación y la extensión exacta de las áreas de recarga de las masas de agua subterránea.

Es por esto por lo que, aún conscientes de que se trata de una aproximación simple, se propuso un modelo que valora la capacidad de recarga de cada masa de agua subterránea localizada dentro del territorio aragonés, teniendo en cuenta la precipitación media anual y la permeabilidad del terreno. Dicho valor procede del cruce de la información cartográfica correspondiente a la precipitación media anual, a la permeabilidad del medio y a la representación superficial de la extensión de las masas de agua subterráneas. Esto permitió compartimentar la superficie que delimita el perímetro de los diferentes acuíferos en áreas de precipitación media anual y permeabilidad homogéneas. Para cada una de estas áreas homogéneas, se multiplicó la precipitación media anual registrada en esa parcela por el área que supone, logrando así un valor relativo a la precipitación anual total en esa superficie. Dicho valor será, posteriormente, multiplicado por una variable ligada a la permeabilidad del territorio: 0,5 para las áreas impermeables, 1 para las de permeabilidad baja, 1,5 para la de permeabilidad media y 2 para las de permeabilidad alta. Las áreas impermeables no han sido ponderadas con un valor de cero, puesto que en estos lugares la escorrentía puede ser

importante, llevando las aguas de precipitación hasta lugares con mayores capacidades de absorción.

La suma de los valores obtenidos en el paso anterior en cada una de las parcelas que componen la superficie total del acuífero, otorgará una aproximación sobre la capacidad de recarga del mismo. Sin embargo, para poder comparar entre sí las diferentes masas de aguas, fue necesario normalizarlas, dividiendo el valor obtenido de la suma de todas las parcelas entre la superficie por la que se extiende la masa de agua subterránea considerada. La limitación espacial de los datos empleados ha condicionado que solo se haya tomado el área del acuífero localizada dentro de la región aragonesa. La fórmula empleada en el cálculo de este indicador, y que esquematiza la explicación aportada hasta el momento será, por tanto, la siguiente:

$$\text{Índice Recarga Acuíferos} = \frac{\sum_{i=1}^{10} \text{Precipitación}_i \cdot k \cdot \text{Área}_i}{\sum \text{Área}_i}$$

Donde  $i$  corresponde a cada una de las 10 categorías en las que se dividió el territorio en función de su precipitación media anual, *Precipitación* es el valor medio de precipitación en mm correspondiente a esa categoría y  $k$  la variable ligada a la permeabilidad del territorio.

En función del valor obtenido en esta aproximación, los acuíferos localizados dentro de las fronteras aragonesas fueron reclasificados en cinco categorías diversas, cada una con un peso asignado, que será máximo en aquellos acuíferos en los que la capacidad de recarga se ha estimado más alta (Tabla 4.12). El valor obtenido según los cálculos realizados hace referencia a cada acuífero en su conjunto, de modo que los registros de la base de datos referentes a explotaciones de agua obtuvieron su valoración en este indicador del resultado logrado por el acuífero sobre el que se localizan.

Tabla 4.12. Categorías que componen el indicador que estudia la capacidad de recarga de los acuíferos. Elaboración propia.

CATEGORÍA	PESO
Capacidad de recarga muy alta	5
Capacidad de recarga alta	4
Capacidad de recarga media	3
Capacidad de recarga baja	2
Capacidad de recarga muy baja	1

#### 4.4.3. Generación y difusión del drenaje ácido de mina y otros tipos de contaminantes

Como se analizó en los capítulos II y III de la tesis, la generación y propagación del drenaje ácido de minas, así como la expansión de otros frentes contaminantes, especialmente los de carácter ácido, son procesos controlados por numerosos factores relacionados con el medio natural. Algunos de ellos, como las altas temperaturas, que aumentan la velocidad de las reacciones generadoras del drenaje ácido de mina, o las precipitaciones elevadas, propiciarán el desarrollo de soluciones ácidas cargadas de elementos químicos procedentes de la lixiviación de los metales. Otros factores tendrán un efecto contrario, actuando como atenuadores de la propagación de este tipo de frentes contaminantes.

El indicador referente a la generación y propagación del drenaje ácido de minas y otros frentes contaminantes será calculado a partir de una serie de factores medibles a escala territorial e influyentes en los procesos que, o bien favorecen, o bien atenúan la generación y propagación de los efluvios contaminantes, prestando especial atención a los relativos al drenaje ácido de minas. Estos factores pueden ser de tipo climático (temperatura y precipitación medias) o geológicos (litología del encajante y tipos, composición y propiedades de los suelos).

En la evaluación de la propensión del medio a generar y difundir el drenaje ácido de minas y otros tipos de contaminantes, para cada uno de los factores apenas nombrados se dividió el territorio una serie de categorías con un valor asignado, que será mayor cuanto más favorables sean sus propiedades a la hora de controlar la dispersión del frente contaminante o menor su capacidad de generación de soluciones contaminantes. Esta categorización fue relativamente sencilla en el caso de la permeabilidad y de las temperaturas y precipitaciones medias anuales, de modo que el valor asignado será menor cuanto mayores sean sus registros. En el caso de la litología y de la cobertura edáfica hubo de considerarse, caso por caso, su capacidad de mitigación, según los conceptos expuestos en el Capítulo II de la tesis.

De este modo, en lo que respecta a la litología de la roca encajante, dentro de la categoría máxima se incluyeron calizas y dolomías y las intercalaciones de calizas y dolomías. En un nivel inferior se incorporaron las margas, las combinaciones litológicas de margas con

otras rocas carbonatadas, en proporciones similares y las calizas y dolomías con rocas detríticas intercaladas. También se incluyeron las rocas volcánicas y plutónicas, puesto que pueden ser ricas en feldspatos, minerales que, si no han sufrido alteración, pueden actuar como consumidores de la acidez.

En el caso de suelos, el valor máximo fue otorgado a aquellos con un mayor poder de contención por sus características texturales y composicionales. Los suelos que poseen una mayor capacidad reactiva frente a este tipo de contaminación serán los Calcisoles, que presentan un horizonte carbonatado y poco permeable capaz de reaccionar con los efluvios ácidos. Otros suelos con presencia de horizontes ricos en materia orgánica (Foezoem y Umbrisol) o los Leptosoles, desarrollados sobre materiales calcáreos, también fueron valorados positivamente. Por el contrario, Cambisoles y Regosoles, suelos sin acumulaciones importantes de materia orgánica o materiales calcáreos, se asignaron a la categoría más baja.

Como ya se ha comentado, y aunque no sea un caso de drenaje ácido de minas, las labores y sobre todo las escombreras de actividades relacionadas con la minería no metálica o de recursos energéticos, pueden producir contaminación de las aguas de escorrentía, de los suelos y de las aguas subterráneas, principalmente por su salinización. Estos procesos también están relacionados con la temperatura y, especialmente, con la cantidad de precipitación recogida en cada punto del territorio, por lo que fueron empleados estos mismos factores para caracterizar el potencial de perturbación de suelos y aguas también en el caso de recursos no metálicos, aunque el peso que se le otorgará al indicador será menor.

El peso específico asignado a cada una de las variables empleadas en el análisis de este indicador también dependió del tipo de recurso analizado. Concretamente, esta valoración se realizó de un modo diferente si el recurso formaba parte del grupo de los *minerales metálicos* y los *recursos energéticos* o pertenecía al resto de categorías.

De este modo, el drenaje ácido de minas será el principal problema asociado a la minería metálica y energética, por lo que la temperatura y precipitación medias, favorecedoras de la generación de este tipo de efluentes contaminantes fue el criterio más valorado, junto con la permeabilidad del medio. El tipo de suelo se consideró el elemento menos relevante, debido

no solo a que las características texturales y composicionales de la cobertura edáfica no juegan un papel tan relevante como los otros criterios, sino que, además, la información disponible referente a la cobertura edáfica de Aragón no es tan completa como la del resto de indicadores (Tabla 4.13.).

*Tabla 4.13. Criterios de valoración del indicador que estudia el Drenaje Ácido de Minas para los minerales metálicos y los recursos energéticos. Elaboración propia.*

<b>CRITERIO (Minerales metálicos y recursos energéticos)</b>	<b>PESO</b>
Temperatura media	0,2
Precipitación media	0,3
Permeabilidad del medio	0,3
Litología de la roca enjacante	0,15
Tipo de suelo	0,05

*Tabla 4.14. Criterios de valoración del indicador que estudia el Drenaje Ácido de Minas y otros tipos de contaminación para los grupos de recursos compuestos por los minerales y rocas industriales, las rocas ornamentales y las aguas. Elaboración propia.*

<b>CRITERIO (Minerales y rocas industriales, rocas ornamentales y aguas)</b>	<b>PESO ESPECÍFICO</b>
Temperatura media	0,1
Precipitación media	0,2
Permeabilidad del medio	0,5
Litología de la roca enjacante	0,15
Tipo de suelo	0,05

Aunque también pueden producirse efluvios contaminantes derivados de la interacción de los agentes atmosféricos con el material que constituye los yacimientos de rocas o minerales industriales o sus subproductos, estos no serán, generalmente, tan graves como el drenaje ácido de minas. Los problemas de contaminación de suelos y aguas subterráneas por la extracción de este tipo de recursos están más relacionados con fugas o emisiones de flujos contaminantes procedentes de la maquinaria y los productos químicos empleados. Por esta razón, se ha otorgado un peso mayor a la impermeabilidad del medio, que oponga oposición a la percolación de estos flujos hacia las aguas subterráneas y los acuíferos (Tabla 4.14.). También en el caso de las explotaciones de agua, los mayores problemas de contaminación de acuíferos procederán de negligencias o accidentes en las labores, que podrían provocar el vertido de combustibles o productos químicos, y cuya propagación se verá controlada principalmente por la mayor o menor permeabilidad de los suelos o rocas.

El valor obtenido de la combinación numérica de todos los factores considerados fue el empleado para el establecimiento de las cinco categorías finales que forman este indicador (Tabla 4.15), en función del potencial del medio para iniciar y expandir los frentes contaminantes procedentes de la actividad minera. Los límites numéricos tomados para establecer las diferentes categorías fueron aquellos que permitieron obtener un número similar de puntos registrados en cada una de ellas. Estos umbrales fueron diferentes para cada uno de los dos grandes grupos de recursos propuestos: *minerales metálicos* y *recursos energéticos*, por un lado, y por otro, *minerales y rocas industriales, rocas ornamentales y aguas*.

Tabla 4.15. Categorías que componen el indicador sobre la generación y difusión del DAM y otros tipos de contaminación. Elaboración propia.

CATEGORÍA	PESO
Potencial de generación y difusión DAM y otros tipos de contaminación más bajo	5
Potencial de generación y difusión DAM y otros tipos de contaminación bajo	4
Potencial de generación y difusión DAM y otros tipos de contaminación medio	3
Potencial de generación y difusión DAM y otros tipos de contaminación alto	2
Potencial de generación y difusión DAM y otros tipos de contaminación más alto	1

#### 4.4.4. Vulnerabilidad frente a eventos naturales extremos

Los riesgos geológicos y meteorológicos son procesos naturales que pueden suponer una amenaza para los intereses humanos cuando alcanzan una magnitud considerable. El valor localizado de la minería, que implica que las labores extractivas deben ser realizadas allí donde se encuentra el recurso, justifica la inclusión en el análisis de un indicador que valore la probabilidad de que se produzcan eventos naturales catastróficos en el lugar donde se asienta el yacimiento. Como ya se comentó en el Capítulo III, los riesgos naturales que se han tomado en consideración en este análisis son el sísmico, el de inundación, el de colapso y el de deslizamiento, así como la probabilidad de que ocurran fenómenos relacionados con lluvias torrenciales y vientos fuertes. Aunque no es descartable que se produzcan fenómenos catastróficos de otra índole, estos son los procesos que acontecen con una mayor frecuencia en el territorio y de los que se dispone de una información adecuada.

De cara al análisis, para cada uno de los riesgos naturales considerados, se fragmentó el territorio en cinco categorías en función del riesgo (excepto en el caso del riesgo de

inundación, en el que la información venía clasificada en tres clases de peligrosidad). Cada una de estas categorías tiene un valor asociado, que fue utilizado en los cálculos concernientes, siendo este más alto cuanto menor sea el riesgo. A continuación, se estableció un peso determinado para cada uno de los riesgos analizados en función de su capacidad destructiva y de la frecuencia con la que ocurren en el territorio. El riesgo natural que afecta al territorio español con mayor frecuencia e intensidad son las inundaciones, que, no en vano, representan más del 85% de las compensaciones relacionadas con riesgos geológicos por compañías de seguros, seguido por la erosión del suelo y los corrimientos de tierra, a mucha distancia (Crespo y Rodrigo, 2008). Sólo en España, las pérdidas debidas a inundaciones se elevan hasta 745 millones de euros al año, casi 20 euros por habitante y año.

Lo expuesto hasta el momento justifica que las inundaciones sean el tipo de riesgo más valorado en la ponderación que calcula la peligrosidad por procesos naturales en el territorio aragonés, con un peso de 0,4, seguida por el riesgo de deslizamiento con 0,2 (Tabla 4.16.). Los movimientos sísmicos, por su parte, tienen una gran capacidad destructiva cuando su intensidad es elevada. Sin embargo, es muy improbable que un terremoto con estas características ocurra en la región aragonesa, por lo que tan solo recibieron una puntuación de 0,05. Otros eventos más frecuentes, como son los colapsos y las lluvias torrenciales, tienen un potencial de destrucción netamente menor que el de los grandes movimientos telúricos, aunque los daños causados por ellos no son desdeñables. Además, y puesto que son eventos relativamente frecuentes, el perjuicio que pueden generar es elevado, por lo que contribuyen con un peso del 15% sobre el valor final. Finalmente, y aunque el viento es un factor habitual en la climatología aragonesa, su capacidad para generar daños no es comparable con la del resto de procesos analizados, por lo que supone tan solo el 5% del valor total de este indicador.

Tabla 4.16. Peso asignado a cada tipo de riesgo en función de su potencial para provocar daños y su frecuencia en el territorio. Elaboración propia.

TIPO DE RIESGO	PESO
Actividad sísmica	0,05
Colapsos	0,15
Deslizamientos	0,2
Inundaciones	0,4
Lluvias torrenciales	0,15
Vientos fuertes	0,05

A partir de los resultados obtenidos en el indicador referente a los Riesgos Geológicos y Climáticos obtenido en el paso anterior, y tal como se refleja en la Tabla 4.17, se establecieron una serie de categorías cuyos límites fueron fijados de forma que el número de elementos presentes en cada una de ellas sea asimilable.

Tabla 4.17. Categorías que componen el indicador que estudia la vulnerabilidad del territorio frente a eventos naturales extremos. Elaboración propia.

CATEGORÍA	PESO
Vulnerabilidad muy baja	5
Vulnerabilidad baja	4
Vulnerabilidad media	3
Vulnerabilidad alta	2
Vulnerabilidad muy alta	1

El peso otorgado a este indicador fue diferente para las tres grandes categorías de recursos establecidas en este análisis. De este modo, será el más valorado en la evaluación de los *minerales y rocas industriales* y de las *rocas ornamentales*, al no existir otros factores más relevantes en relación con sus particularidades, como sí sucedía con el drenaje ácido de minas y los *minerales metálicos y energéticos*, o la capacidad de recarga de los acuíferos en la categoría de las *aguas*.

#### 4.5. INSERCIÓN SOCIOECONÓMICA

Esta dimensión está compuesta por indicadores que analizan qué efectos generarían las potenciales labores extractivas, derivadas de la puesta en marcha de una actividad minera que explote los diferentes yacimientos e indicios minerales, en los elementos antrópicos, los seres humanos y sus intereses. Es decir, en este apartado se evalúa de qué manera diferentes factores demográficos y ambientales del entorno influyen en el mayor o menor interés de las actividades mineras.

En la valoración de esta dimensión se tomaron en consideración siete indicadores de diversa naturaleza y complejidad (Tabla 4.18). Algunos de ellos son de tipo inmediato, resultado de categorizar el territorio en función de una serie de parámetros simples, mientras que otros requerirán de la creación de índices complejos para poder ser analizados. Como ocurría en la dimensión descrita anteriormente (*Aptitud del terreno*), estos indicadores estarán ligados al territorio y a lo que sobre él se localiza, al contrario de lo que sucedía en el caso de la dimensión relacionada con el *Perfil Geológico*, donde los indicadores analizaban aspectos del propio yacimiento o del recurso explotable.

Cada uno de los indicadores que componen esta dimensión será valorado con un peso específico en función de su relevancia. La forma de ponderar dichos indicadores será similar para todos los grupos de recursos que componen el inventario (*minerales metálicos, recursos energéticos e hidrocarburos no convencionales, rocas y minerales industriales y rocas ornamentales*), con la excepción del relativo a las *aguas*, cuyo análisis será ligeramente diferente debido a su carácter potencialmente renovable. Concretamente, esta diferencia se traducirá en la forma de estudiar el impacto potencial en la economía local, que como se verá más adelante, será valorado con un peso mayor. El hecho de que el recurso sea potencialmente renovable a escala humana, siempre que se haga un aprovechamiento adecuado del acuífero, favorecerá el asentamiento de la actividad durante un tiempo más prolongado al no estar condicionada por el agotamiento del recurso, permitiendo actuar de una forma más efectiva al multiplicador regional y aumentando, así, las posibilidades de diversificación de la economía gracias al recurso. Por otro lado, y puesto que la construcción de pozos para la extracción de aguas suele ser una actividad mucho menos agresiva con el medioambiente que la explotación de recursos minerales en canteras o minas, los indicadores relacionados con el análisis de las afectaciones a los seres humanos, el paisaje o a la cubierta vegetal tendrán, para el grupo de las aguas, un peso asignado menor que para el resto de los casos.

En conjunto, el indicador más valorado, junto con el acceso a las infraestructuras, será el que estudia el impacto potencial en la economía local de las localidades localizadas en el entorno de la actividad minera. Sin embargo, la población de estos núcleos puede verse afectada por externalidades negativas de diversa índole si se encuentra directamente

expuesta a la labor minera. Este indicador será valorado igualmente con un peso alto, pero no tanto como los anteriores, debido a que existen numerosos métodos para minimizar las molestias que la actividad minera causa en la población. Con un peso medio se ponderarán los indicadores que estudian la relación de la labor minera con el paisaje, la vegetación, la cubierta vegetal y los usos del suelo, así como las limitaciones a la puesta en marcha de labores mineras por la existencia en el territorio de figuras legales destinadas a la protección del patrimonio natural y cultural. El indicador menos valorado será el que analiza el régimen de propiedad de los terrenos por los que se extiende cada mineralización.

Tabla 4.18. Indicadores empleados en el análisis de la dimensión inserción socioeconómica, su valoración y las categorías que componen cada uno de ellos. Elaboración propia.

INDICADOR	PESO C.1 <sup>15</sup>	PESO C.2 <sup>16</sup>	PESO C.3 <sup>17</sup>	CATEGORÍA	PESO
RÉGIMEN DE PROPIEDAD	0,075	0,075	0,075	Índice densidad parcelaria + límites administrativos muy bajo	5
				Índice densidad parcelaria + límites administrativos bajo	4
				Índice densidad parcelaria + límites administrativos medio	3
				Índice densidad parcelaria + límites administrativos alto	2
				Índice densidad parcelaria + límites administrativos muy alto	1
ACCESO A LAS INFRAESTRUCTURAS	0,2	0,2	0,2	Accesibilidad muy alta	5
				Accesibilidad alta	4
				Accesibilidad media	3
				Accesibilidad baja	2
				Accesibilidad muy baja	1
IMPACTO POTENCIAL EN LA ECONOMÍA LOCAL	0,2	0,2	0,3	El más alto	5
				Alto	4
				Medio	3
				Bajo	2
				El más bajo	1
NIVEL DE EXPOSICIÓN DE LOS NÚCLEOS DE POBLACIÓN	0,125	0,125	0,075	Grado de exposición muy bajo	5
				Grado de exposición bajo	4
				Grado de exposición medio	3
				Grado de exposición alto	2
				Grado de exposición muy alto	1
AFECTACIONES DE LOS BOSQUES Y DE LA CUBIERTA VEGETAL	0,1	0,1	0,075	Grado de afectación muy bajo	5
				Grado de afectación bajo	4
				Grado de afectación medio	3
				Grado de afectación alto	2
				Grado de afectación muy alto	1
RESTRICCIONES POR FIGURAS DE PROTECCIÓN	0,15	0,15	0,15	Sin restricciones	5
				Restricción baja	4
				Restricción media	3
				Restricción alta	2
				Restricción muy alta	1
AFECTACIONES DEL PAISAJE	0,15	0,15	0,125	Grado de afectación muy bajo	5
				Grado de afectación bajo	4
				Grado de afectación medio	3
				Grado de afectación alto	2
				Grado de afectación muy alto o localización en parajes especialmente valorados a nivel local	1

<sup>15</sup> Minerales Metálicos y Recursos Energéticos (e Hidrocarburos no convencionales)

<sup>16</sup> Rocas Industriales, Minerales Industriales y Rocas Ornamentales

<sup>17</sup> Aguas

En los siguientes apartados vendrán analizados en detalle cada uno de los indicadores empleados en la valoración de esta dimensión, estudiando las categorías en las que se ha dividido cada uno de ellos y el peso que se les ha asignado.

#### 4.5.1. Régimen de propiedad del terreno

Una vez determinada la problemática expuesta en el tercer capítulo en relación con el acceso al terreno donde se ubican los yacimientos mineros, y aprovechando los datos de parcelación disponibles tanto en la Infraestructura de Datos Espaciales de Aragón como en la Sede Electrónica del Catastro, se procedió a proyectar una metodología que permitiera comparar entre sí los diferentes puntos inventariados. Para ello, y en primer lugar, se calculó el grado de parcelación en un radio de 1.300 metros en torno a cada indicio o yacimiento mineral. El límite de 1,3 kilómetros establecido procede del análisis del tamaño medio de las explotaciones mineras presentes en el territorio aragonés efectuado en el marco de esta tesis, y que se expone de modo detallado en el Capítulo III.

Para determinar el grado de parcelación se propuso un índice que calculara el número de parcelas que existen dentro del área de influencia (de 1,3 km de radio) dividido por la superficie que ocupa esa área de influencia. Se decidió estimar este índice en forma de densidad (número de parcelas por kilómetro cuadrado), debido a la imposibilidad de encontrar información relevante sobre la fragmentación de los terrenos en territorio francés. Por tanto, en los cálculos correspondientes a la mayor parte de los puntos listados, la superficie por la que se divide el número total de parcelas será de aproximadamente 5,31 km<sup>2</sup>. La única excepción fueron los indicios o yacimientos localizados a menos de 1.300 metros del país galo, situación en la que el número de total de parcelas en el área de influencia se dividió entre la superficie de esa área de influencia que se localizaba en territorio español.

Por otra parte, para poder evaluar los inconvenientes derivados de la existencia de varias administraciones en el área donde se planea iniciar una labor extractiva, fue impuesta una penalización a aquellos registros del inventario en los que el área delimitada por la circunferencia se extendiera por dos o más límites administrativos diferentes. Esta sanción, que fue adicionada al índice de parcelación calculado en el paso anterior, es proporcional a

la importancia del límite administrativo, es decir, menor si el área de influencia se expande por dos o más términos municipales que por varias provincias diferentes. La penalización más alta se corresponde con la asignada a aquellos puntos que distan menos de 1.300 metros de la frontera con Francia.

Los valores seleccionados para ser sumados al índice de parcelación en aquellos puntos localizados en varias administraciones territoriales (Tabla 4.19), se fijaron teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el análisis sobre la densidad parcelaria del paso anterior, con el objetivo de que esta penalización tuviera una influencia real en resultado sin modificar excesivamente el resultado original.

*Tabla 4.19. Valor adicionado a la densidad parcelaria por la extensión del área proyectada para la actividad minera por varias entidades administrativas. Elaboración propia.*

TIPO DE LÍMITE ADMINISTRATIVO	VALOR ADICIONADO
Municipio	10
Provincia	20
Comunidad Autónoma	40
País	75

Estas penalizaciones son acumulativas (Figura 4.6.), de modo que si un yacimiento se encuentra en el límite de tres municipios diferentes sumará un valor de 20 a su densidad de parcelación (y no 30, porque el yacimiento siempre se va a situar, al menos, en un municipio concreto de una provincia localizada en una Comunidad Autónoma). Si por el contrario el elemento puntual analizado se encuentra en la frontera administrativa entre dos comunidades autónomas, el valor mínimo que será adicionado al valor de densidad obtenido previamente será de 70, ya que, necesariamente, el área de influencia creada para el análisis estará localizada sobre dos municipios diferentes, de dos provincias diversas en dos comunidades autónomas distintas.



*Figura 4.6. Derecho Minero autorizado en la localidad de Tarazona (Zaragoza). El área de influencia de 1.300 metros utilizada en los cálculos relacionados con este indicador se extiende, además, por los municipios de Cervera del Río Alhama (La Rioja) y Ágreda (Soria), es decir, por dos provincias de dos regiones diferentes. El valor añadido a la densidad parcelaria será por tanto de 140 (10x2 municipios, más 20x2 provincias más 40x2 regiones). El número de parcelas por km<sup>2</sup> en este ejemplo es de 213,22, por lo que el valor final del índice empleado en esta categoría ascenderá hasta 353,22. Elaboración propia.*

El índice final obtenido, resultado de adicionar la penalización relativa a los límites administrativos al valor referente a la densidad parcelaria, servirá para establecer las diferentes categorías que componen este indicador (Tabla 4.20.).

*Tabla 4.20. Categorías en las que se divide el indicador referente al régimen de propiedad del terreno. Elaboración propia.*

CATEGORÍA	PESO
Índice densidad parcelaria + límites administrativos muy alto	1
Índice densidad parcelaria + límites administrativos alto	2
Índice densidad parcelaria + límites administrativos medio	3
Índice densidad parcelaria + límites administrativos bajo	4
Índice densidad parcelaria + límites administrativos muy bajo	5

Los valores que se establecieron como umbrales entre las diversas categorías han sido aquellos que permiten obtener grupos con un número similar de elementos.

#### 4.5.2. Acceso a las infraestructuras

Este indicador valora, en su conjunto, las redes suministradoras de bienes y servicios descritas en el Capítulo III, analizando, por separado, el acceso desde cada punto del territorio a la red de transporte y al suministro de agua, electricidad y combustible.

Aragón, debido a su posición de Comunidad interior carece de puertos marítimos (tampoco existen puertos fluviales) que permitan el transporte de los productos minerales por barco, un método muy común en las transacciones internacionales de este tipo de bienes. Como el transporte de mercancías tan pesadas por métodos aéreos no es ni relevante ni común, el criterio que valora la accesibilidad del territorio aragonés estará basado en los modos de transporte terrestre, concretamente en la presencia de redes viarias y de ferrocarril. De esta forma, se ha valorado la proximidad de cada punto del territorio a los diferentes tipos de vías que conforman la red de transporte de Aragón. Las carreteras manejadas en este criterio fueron categorizadas, en función del tipo de vía, como autopistas y autovías, carreteras nacionales, carreteras autonómicas, carreteras locales y caminos y pistas forestales. Esta sistematización será empleada posteriormente en el cálculo de la accesibilidad a los yacimientos estudiados. Las autopistas, autovías y carreteras nacionales son los tipos de vía más rápidas y las que van a generar, junto con las vías de ferrocarril, una mayor diferenciación en los valores de accesibilidad en el territorio aragonés, puesto que son las más escasas. Las carreteras autonómicas, y sobre todo las locales son mucho más abundantes y provocarán diferencias de accesibilidad exclusivamente a nivel local.

Para determinar la mayor o menor *accesibilidad a la red de transporte* desde cada uno de los yacimientos inventariados, se calculó si ese punto en concreto se localizaba fuera o dentro del área de influencia generado por el conjunto de vías de comunicación de cada categoría (Tabla 4.12). El radio de esta área de influencia vino determinado por la entidad de la vía considerada, siendo mayor cuanto más importante e infrecuente sea en el territorio. La proximidad a vías más importantes implicará una valoración de accesibilidad mayor, y se considerará máxima cuando el yacimiento se encuentre próximo a cada una de las cuatro categorías de carreteras establecidas y dentro del área de influencia de las vías férreas (lo que asegura no solo la posibilidad de transportar el mineral extraído desde la explotación

local hasta los mercados internacionales a través de autopistas y autovías, sino también de poder diversificar las opciones de transporte mediante el ferrocarril).

*Tabla 4.21. Elementos que valoran la accesibilidad al yacimiento, radio de influencia y peso relativo. Elaboración propia.*

CATEGORÍA	ÁREA DE INFLUENCIA	VALORACIÓN
Carreteras locales, sendas y caminos	1 km	1,5 puntos
Carreteras autonómicas	5 km	1,5 puntos
Carreteras nacionales	10 km	2 puntos
Autopistas y autovías	20 km	2 puntos
Vías de ferrocarril	10 km	3 puntos
	Total:	10 puntos

La *disponibilidad de agua* en las áreas donde se localizan los yacimientos minerales inventariados se ha conjeturado analizando la existencia en esos territorio de acuíferos, masas de aguas superficiales (embalses, presas y pantanos), ríos y cauces artificiales de cierta entidad y, finalmente, depósitos de agua. Los puntos más valorados fueron aquellos que se situaban sobre masas de agua subterráneas que permitan la extracción de importantes caudales a través del bombeo de pozos. También recibieron una puntuación alta aquellos yacimientos o indicios minerales localizados en las proximidades de masas de agua superficiales (embalses, presas, pantanos...) de una cierta entidad. El límite establecido para determinar la cercanía o no a estas masas de agua fue fijado en una distancia de 15 km.

El siguiente elemento que se ha considerado en la valoración del acceso al agua de los yacimientos es la proximidad a los ríos. Se han tomado para el análisis solo aquellos cursos de agua, tanto naturales como artificiales, de cierta entidad y que presentan un caudal perenne. El límite establecido para delimitar la proximidad a los cauces de agua ha sido de 10 km, lo que engloba prácticamente toda la totalidad de la Comunidad Autónoma de Aragón. El aspecto menos puntuado en la valoración de la accesibilidad al agua ha sido la proximidad a depósitos de agua, puesto que aunque su capacidad de almacenaje no será lo suficientemente grande como para suministrar los grandes caudales necesarios en algunos procesos mineros, sí que podría ser suficiente para surtir pequeñas cantidades que permitan completar acciones como la limpieza de maquinaria o el abastecimiento de los edificios anexos a la explotación minera. Debido a su menor entidad, el límite establecido para los depósitos de agua se fijó en 5 kilómetros.

Tabla 4.22. Elementos que valoran el acceso al agua, área de influencia y peso relativo. Elaboración propia.

CATEGORÍA	ÁREA DE INFLUENCIA	VALORACIÓN
Acuíferos	Coincidencia espacial	4 puntos
Embalses, pantanos, presas	15 km	3 puntos
Ríos y cauces artificiales	10 km	2 puntos
Depósitos de agua	5 km	1 punto
	Total:	10 puntos

El valor final que categoriza el acceso al agua de cada punto inventariado vino definido por la suma de la puntuación obtenida en el acceso a cada tipo de elemento considerado. En la Tabla 4.22. se presentan de forma resumida los aspectos considerados para la obtención del valor final y las distancias establecidas para el cálculo.

Para valorar el *acceso a la electricidad* desde las diferentes mineralizaciones presentes en el territorio se utilizó un criterio de proximidad lineal a diversos tipos de infraestructuras relacionadas con el suministro eléctrico. Como alguna de la maquinaria empleada en las labores de extracción minera requiere de grandes cantidades de energía eléctrica para su funcionamiento, el criterio más valorado fue la cercanía a estaciones y, esencialmente, a subestaciones eléctricas de diferentes tipos. La proximidad a estas infraestructuras asegurará un suministro continuo y de gran magnitud. Para el resto de maquinaria, así como para el normal funcionamiento de los edificios auxiliares, bastará con que exista una conveniente red de cableado eléctrico. El acceso a las mismas fue evaluado también siguiendo un criterio de proximidad, diferenciando entre líneas que conducen corrientes de alta tensión de aquellas de baja tensión.

Como se ha venido analizando, el acceso a la electricidad fue calculado siguiendo criterios de proximidad lineal a diversas infraestructuras relacionadas con la generación y transporte de electricidad. Los rangos de distancia empleados, así como la valoración recibida, vienen resumidos en la siguiente Tabla 4.23 y, como puede ser observado, serán variables en función de la categoría de la infraestructura considerada.

Tabla 4.23. Aspectos que analizan el acceso a la electricidad, su área de influencia y su peso relativo. Elaboración propia.

CATEGORÍA	ÁREA DE INFLUENCIA	VALORACIÓN
Centrales eléctricas		
	0-5 km	3,5 puntos
	5-10 km	2,5 puntos
	10-20 km	1 punto
Subestaciones eléctricas		
	0-5 km	5 puntos
	5-10 km	3 puntos
	10-20 km	1 punto
Líneas eléctricas de alta tensión	10 km	1 punto
Líneas eléctricas de baja tensión	10 km	0,5 punto
	Total:	10 puntos

La maquinaria empleada en el desarrollo de la actividad minera también necesita del consumo de *gas natural y combustibles* derivados del petróleo para su correcto funcionamiento. Además, este tipo de carburantes serán esenciales en procesos relacionados con el tratamiento del mineral extraído, como en la pirometalurgia, donde el calor necesario para el refinado del mineral procede de la quema de productos como el gas natural, petróleo, gas de coque o carbón (Restrepo Baena, Bustamante Rúa, y Gaviria Cartagena, 2008). La manera más sencilla para asegurar el abastecimiento de un flujo continuo y abundante a la maquinaria empleada en las labores estará relacionada con la proximidad del yacimiento a las grandes infraestructuras de transporte y dispensación del combustible, es decir, a oleoductos y gasoductos. La vecindad a gasoductos y oleoductos, considerando como cercanos los yacimientos ubicados a menos de 15 kilómetros de este tipo de conducciones, fue, por tanto, el criterio con mayor peso a la hora de valorar el *acceso al combustible*. Por otro lado, para el funcionamiento de la maquinaria y de los vehículos, tanto los de la empresa como los de los trabajadores, será importante la presencia en el entorno del yacimiento de depósitos de combustible y áreas de servicio en las que se puedan abastecer de carburante. En este caso, la proximidad al yacimiento fue ponderada en función del tiempo de recorrido, en vez de utilizar la distancia kilométrica existente entre ambas ubicaciones. Para ello se analizó, utilizando el modelo de red generado a partir del conjunto de carreteras aragonesas y de áreas colindantes (cuyas características son explicadas en el capítulo V de la tesis, concretamente en el subapartado 5.2.2.3. *Generación de un Dataset de Red*), las áreas que quedaban englobadas dentro de

diferentes rangos de tiempo en torno a las estaciones de servicio y los depósitos de combustibles. Los intervalos que se tomaron fueron más amplios en el caso de los depósitos de combustible, al considerar su presencia más interesante para la actividad minera que la de las áreas de servicio. Así, se hallaron las zonas situadas a menos de 10 minutos de distancia de algún depósito, las localizadas en un rango comprendido entre 10 y 15 minutos y, finalmente, entre 15 y 25 minutos, adjudicando un peso menor a medida que aumenta el tiempo de acceso. Para las áreas de servicio se procedió de forma similar, siendo los rangos establecidos, en este caso, de entre 0 y 5 minutos, de 5 a 10 minutos y de 10 a 15 minutos.

De forma esquemática, se recogen en la Tabla 4.24. los criterios empleados para la valoración del acceso al combustible, delimitando las distancias y tiempos empleados en el establecimiento de las diferentes categorías, así como el peso otorgado a cada una de ellas.

*Tabla 4.24. Elementos que analizan el acceso al combustible, área de influencia y valoración. Elaboración propia.*

CATEGORÍA	ÁREA DE INFLUENCIA	VALORACIÓN
Gasoductos	15 km	3,5 puntos
Oleoductos	15 km	3 puntos
Depósitos de combustible	0-10 minutos	2 puntos
	10-15 minutos	1,5 puntos
	15-25 minutos	0,5 puntos
Áreas de servicio	0-5 minutos	1,5 puntos
	5-10 minutos	1 punto
	10-15 minutos	0,5 puntos
	Puntuación máxima:	10 puntos

Del mismo modo que en el resto de indicadores analizados en esta dimensión, el concerniente al *acceso a las infraestructuras* consta también de cinco categorías diferentes, a las que se les otorgó un valor creciente entre 1 y 5 en función de que el acceso a los distintos tipos de elementos estudiados fuera mayor. La pertenencia a una u otra categoría dependerá de un valor derivado de los resultados obtenidos en el análisis de la accesibilidad relativo a cada uno de los cuatro elementos estudiados: *transporte, agua, electricidad y combustible*. Este valor se corresponde con la media aritmética de los resultados obtenidos en el análisis referente al acceso a cada uno de los factores estudiados, y presenta una valoración numérica comprendida entre 0 y 10. De esta forma, cada punto del territorio

tendrá asociado un valor incluido dentro de este conjunto numérico y que será el reflejo de la posibilidad de acceso a una red de transportes adecuada, y al agua, la electricidad y el combustible de forma eficiente y abundante. Por tanto, aquellos lugares cuyo valor asociado sea muy bajo presentarán una deficiente red de suministro de infraestructuras, mientras que aquellas que hayan obtenido la puntuación máxima, 10, tendrán un acceso óptimo a ellas. Este valor servirá para reclasificar los registros del inventario en 5 categorías diferentes en función del mayor o menor acceso a las infraestructuras desde el lugar donde se localizan, como se recoge de forma esquemática en la Tabla 4.25.

*Tabla 4.25. Categorías en las que se descompone el indicador referente al acceso a las infraestructuras y su peso asociado. Elaboración propia.*

CATEGORÍA	PESO	RANGO DE VALORES <sup>18</sup>
Accesibilidad muy baja	1	0-1,99
Accesibilidad baja	2	2-3,99
Accesibilidad media	3	4-5,99
Accesibilidad alta	4	6-7,99
Accesibilidad muy alta	5	8-10

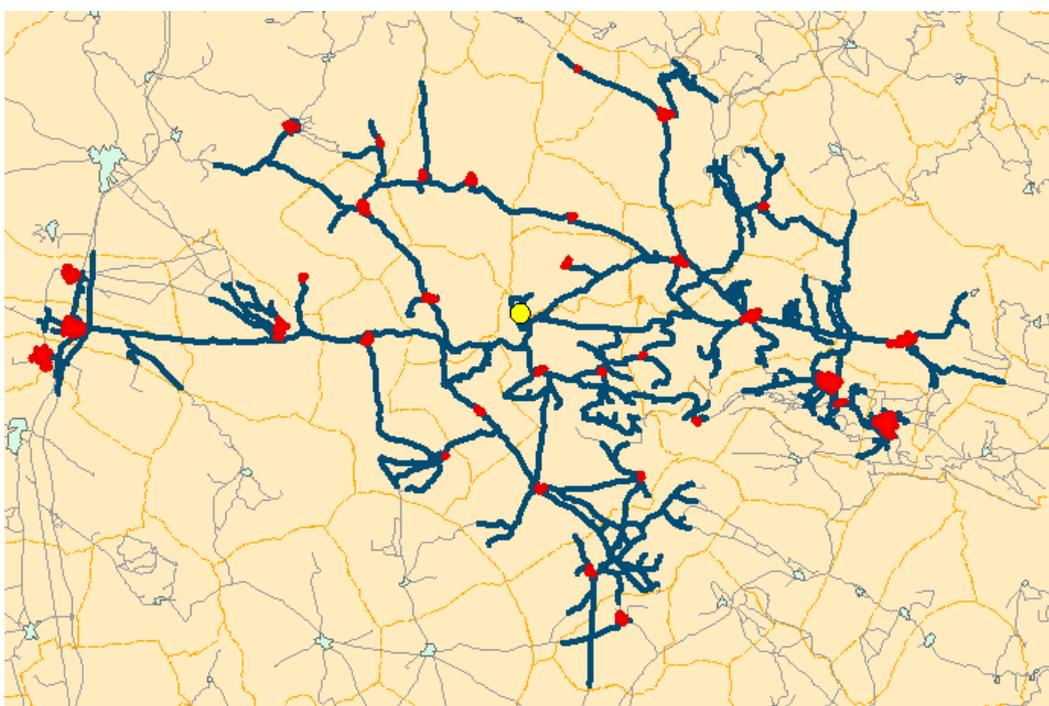
#### 4.5.3. Impacto potencial en la economía local

La determinación del impacto potencial de la actividad minera en la economía local parte del supuesto de que dicho impacto depende del tamaño medio de los núcleos de población localizados en el entorno del yacimiento mineral. El parámetro de impedancia empleado para la delimitación del área de influencia fue de tipo temporal, estableciendo sus límites en 25 minutos de distancia a partir del registro inventariado, al considerarse un intervalo razonable para que el trabajador acuda diariamente desde cualquiera de las localidades localizadas dentro de la misma (Figura 4.7.).

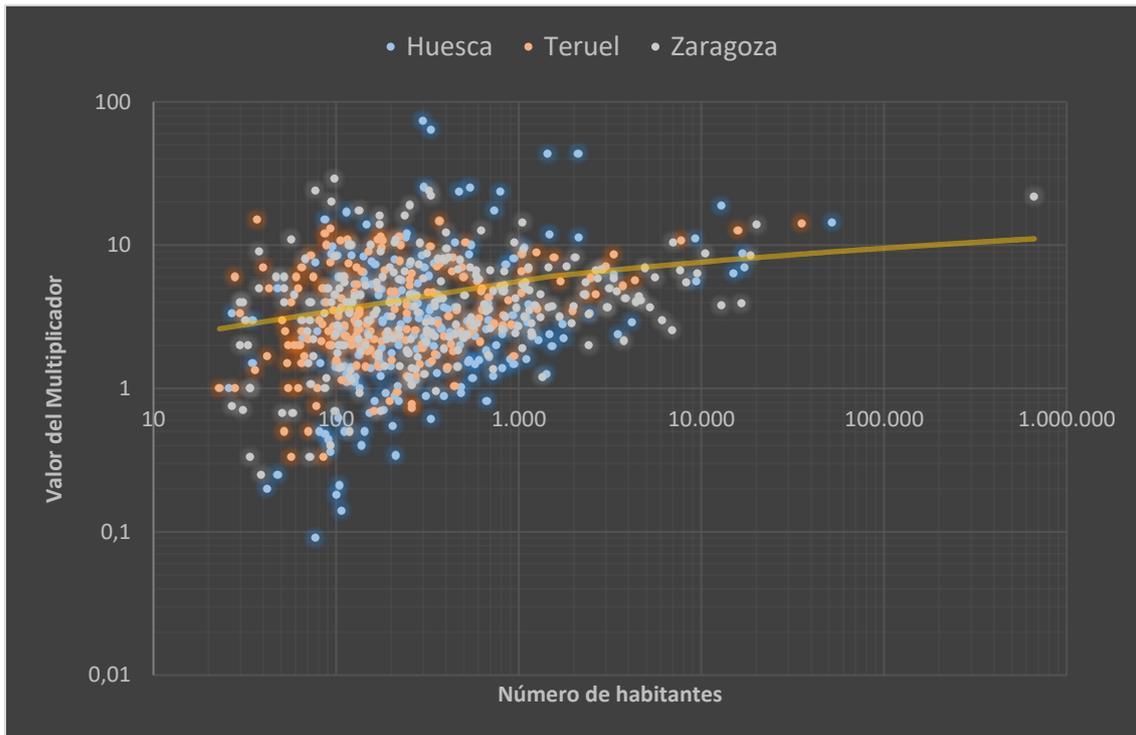
Una vez determinados todos los núcleos de población existentes dentro del área de influencia se procedió a calcular el tamaño medio de estas localidades, dividiendo la población residente total entre el número de centros habitados. En función del tamaño medio de los núcleos de población localizados dentro del área de influencia, los diferentes puntos inventariados fueron reclasificados en cinco categorías diferentes, a las que fueron

<sup>18</sup> Cifra referente al resultado obtenido de la media aritmética de los valores relativos al análisis de accesibilidad para cada uno de los elementos estudiados: agua, electricidad, combustible y transporte.

asignados valores comprendidos entre 1 y 5, expresando 1 el valor mínimo y 5 el máximo en relación con el impacto potencial en la economía local. Hemos tenido en consideración que el potencial de impacto se relaciona con el número de habitantes de los núcleos habitados, como se deduce de un análisis sencillo en el que se compara el valor del multiplicador de la base económica de los municipios con el tamaño de los mismos. En las figuras (Figura 4.8., Figura 4.9., y Figura 4.10.) se muestran los resultados de dicho análisis, realizado a partir de los datos disponibles sobre empleo y población en los municipios aragoneses, procedentes del Instituto Aragonés de Estadística (IAEST).

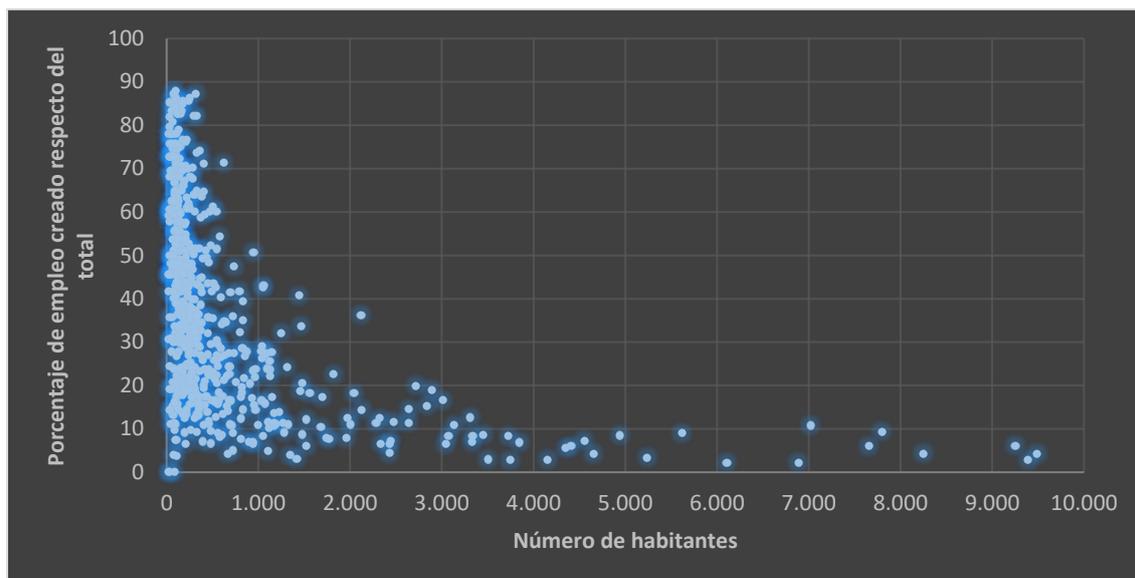


*Figura 4.7: Ejemplo de área de influencia delimitada por un tiempo de 25 minutos desde una mineralización (círculo amarillo), simbolizada por una línea azul oscura superpuesta a las líneas de transporte. Los núcleos de población que quedan dentro de su área de influencia se encuentran resaltados en color rojo. Elaboración propia.*



*Figura 4.8: Relación entre el valor del multiplicador de la base económica y el tamaño municipal. Elaboración propia.*

La Figura 4.8, a pesar de la dispersión de los datos, señala una cierta correlación positiva entre el valor del multiplicador y el tamaño de municipio. Para precisar el sentido de la relación se aplicó el multiplicador en dos casos hipotéticos de apertura de una explotación minera con 10 y 100 empleos, respectivamente. Los gráficos resultantes, Figura 4.9. y Figura 4.10., representan el porcentaje de empleos directos e indirectos generados en ambos casos, ordenados en función de la población municipal total, limitada a menos de 10.000 habitantes en el primer caso.



*Figura 4.9. Porcentaje potencial de empleo directo e indirecto por la apertura de una actividad minera de 10 empleados (en localidades menores de 10.000 habitantes). Elaboración propia.*

La conclusión aproximada que puede extraerse de la figura Figura 4.9. es que la apertura de una actividad minera tendrá una mayor repercusión, en términos de porcentaje de empleos creados con respecto del total, en los municipios más pequeños, especialmente en aquellos menores de 1.000 habitantes. Conforme crece la población, el impacto será, en su conjunto, sustancialmente menor. En los municipios mayores de 3.000 habitantes, el incremento de empleo directo e indirecto generado por una actividad económica modesta no supera el 10% en prácticamente ningún caso. Resultados esencialmente similares se obtienen si se considera que la labor extractiva generaría 100 empleos directos, como muestra el gráfico correspondiente (Figura 4.10). En este caso se han representado los municipios mayores de 10.000 habitantes, por lo que se ha optado por utilizar una escala logarítmica. La línea de tendencia, representada en color naranja, muestra un claro descenso en el impacto del empleo generado conforme el municipio es mayor.

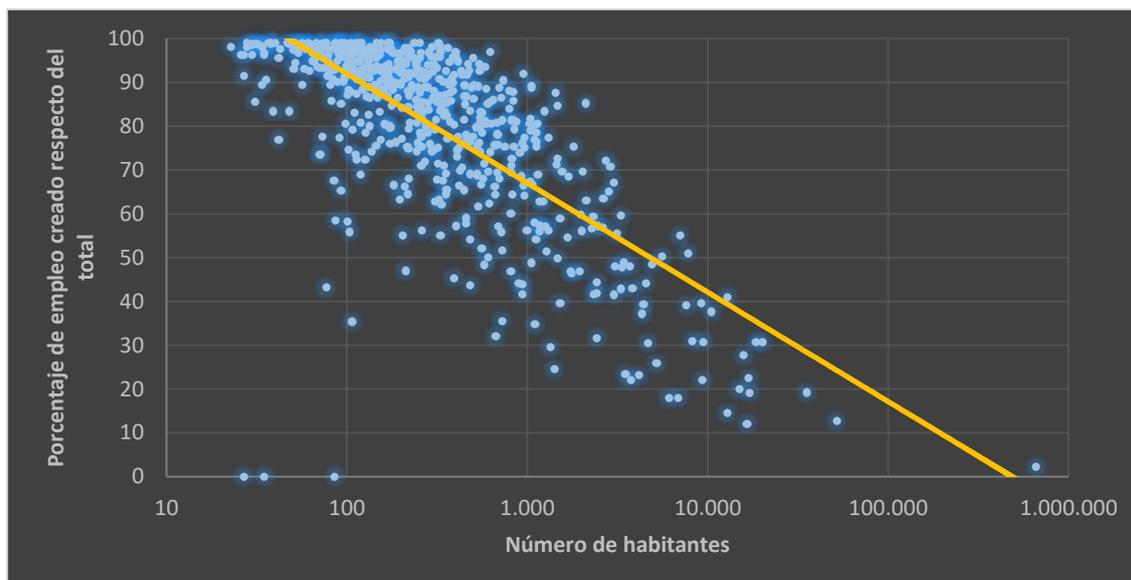


Figura 4.10. Gráfico resultante de la repetición del análisis aumentando el número de empleos directos creados a 100. Elaboración propia.

Como consecuencia de los análisis expuestos la ponderación de los tamaños municipales según el impacto potencial de las actividades mineras en sus economías queda como sigue (Tabla 4.26.):

Tabla 4.26. Categorías que componen el indicador que analiza el impacto potencial en la economía local, umbrales establecidos y peso asignado. Elaboración propia.

CATEGORÍA	UMBRAL (Nº habitantes/Nº Municipios)	PESO
Impacto potencial en la economía bajo	1-99	2
Impacto potencial en la economía alto	100-499	4
Impacto potencial en la economía más alto	500-1.000	5
Impacto potencial en la economía medio	1.001-3.000	3
Impacto potencial en la economía más bajo	Más de 3.000 (o áreas deshabitadas)	1

No es una asignación lineal, ya que el valor más alto en este indicador lo obtuvieron aquellos puntos localizados en territorios en los que el tamaño medio de los municipios es de entre 500 y 1.000 habitantes. Por debajo de este umbral es razonable asumir que el impacto potencial de la minería en la generación de empleos se verá mermado por los problemas típicos de los pequeños municipios, que fueron analizados durante la revisión bibliográfica expuesta en el Capítulo II, y que se relacionan con el envejecimiento y la falta de mano de obra local, el escaso atractivo y la dificultad para albergar a trabajadores venidos de otras áreas, o la menor capacidad de diversificar los beneficios procedentes de la

actividad minera, entre otros. Por encima de los 3.000 habitantes, el impacto generado por la apertura de una actividad minera será proporcionalmente más modesto, por lo que recibieron el valor mínimo en este indicador. Cabe añadir, por último, que los yacimientos localizados en áreas completamente deshabitadas fueron incluidos en la categoría más baja.

Por otro lado, se tuvo en cuenta el mayor poder de atracción de los grandes núcleos poblacionales con respecto a las localidades más pequeñas. Así, si el área de influencia incorporaba a alguna ciudad de más de 19.000 habitantes, el yacimiento asociado a ella fue directamente asignado a la categoría menor, puesto que los empleados se sentirán más atraídos por la idea de residir en la localidad que cuente con más servicios y posibilidades, en detrimento de otros núcleos quizás más cercanos a la potencial labor minera, pero con una población menor.

Las determinaciones de ponderación expuestas no se aplican a las aguas (Tabla 4.27.), ya que, al tratarse de un recurso renovable, la explotación tendrá una mayor continuidad en el tiempo siempre que se haga un aprovechamiento sostenible y responsable del acuífero que las suministra. Esto facilitará que los trabajadores venidos de fuera se asienten en el territorio de forma continua, activando la acción del multiplicador regional y revitalizando la economía local. Por tanto, en el caso de las aguas, fueron los municipios más pequeños los mejor valorados en este indicador. No obstante, a la categoría más valorada se incorporaron aquellos registros en los que el tamaño medio de los núcleos situados dentro del área de influencia se sitúa en el umbral comprendido entre los 100 y los 500 habitantes, al considerar que las áreas en las que este intervalo es menor seguirán manteniendo los problemas asociados a los municipios más pequeños.

*Tabla 4.27. Categorías que componen el indicador que analiza el impacto potencial en la economía local para el caso de las aguas, umbrales establecidos y peso asignado. Elaboración propia.*

CATEGORÍA	UMBRAL (Nº habitantes/Nº Municipios)	PESO
Impacto potencial en la economía alto	1-99	4
Impacto potencial en la economía más alto	100-499	5
Impacto potencial en la economía medio	500-1.000	3
Impacto potencial en la economía bajo	1.001-3.000	2
Impacto potencial en la economía más bajo	Más de 3.000 (o áreas deshabitadas)	1

#### 4.5.4. Nivel de exposición de los núcleos de población

Este indicador valora el grado de exposición de los núcleos de población a los puntos inventariados como indicios o yacimientos minerales localizados en sus proximidades. Para ello, se decidió ejecutar un análisis de visibilidad desde cada ubicación correspondiente con un registro catalogado dentro del inventario. Este análisis determina la existencia de interacciones topográficas entre dos puntos del territorio, lo que extrapolado a nuestros intereses se traducirá en la posibilidad de determinar el mayor o menor grado de aislamiento de la mina con respecto de los núcleos de población presentes a su alrededor, o a la inversa, el aislamiento de los centros poblados en relación con las labores extractivas.

Para poder establecer una comparación entre los puntos que componen el inventario en función de su grado de aislamiento, se llevó a cabo un análisis que calculara la cantidad de población que se vería directamente expuesta a los impactos de la minería al no existir barreras topográficas que las mitiguen. De esta forma se obtuvo el valor correspondiente a la suma del número de habitantes de los municipios localizados dentro del rango de visibilidad desde la potencial explotación minera, a una distancia máxima de 5 kilómetros (Figura 4.11.). Dicho radio se estableció debido a que, aunque el viento tiene capacidad de transportar partículas, especialmente las de menor tamaño, a distancias de miles de kilómetros, las molestias o externalidades negativas, derivadas de la actividad minera, tales como la dispersión de partículas en suspensión o la intensidad del ruido, serán siempre mayores en sus proximidades, afectando a las poblaciones vecinas. Por el contrario, la disminución de la concentración de partículas en el aire y la atenuación de las ondas sonoras con la distancia, hará que tales externalidades sean menores para las personas que habitan en núcleos de población más alejados de ellas.

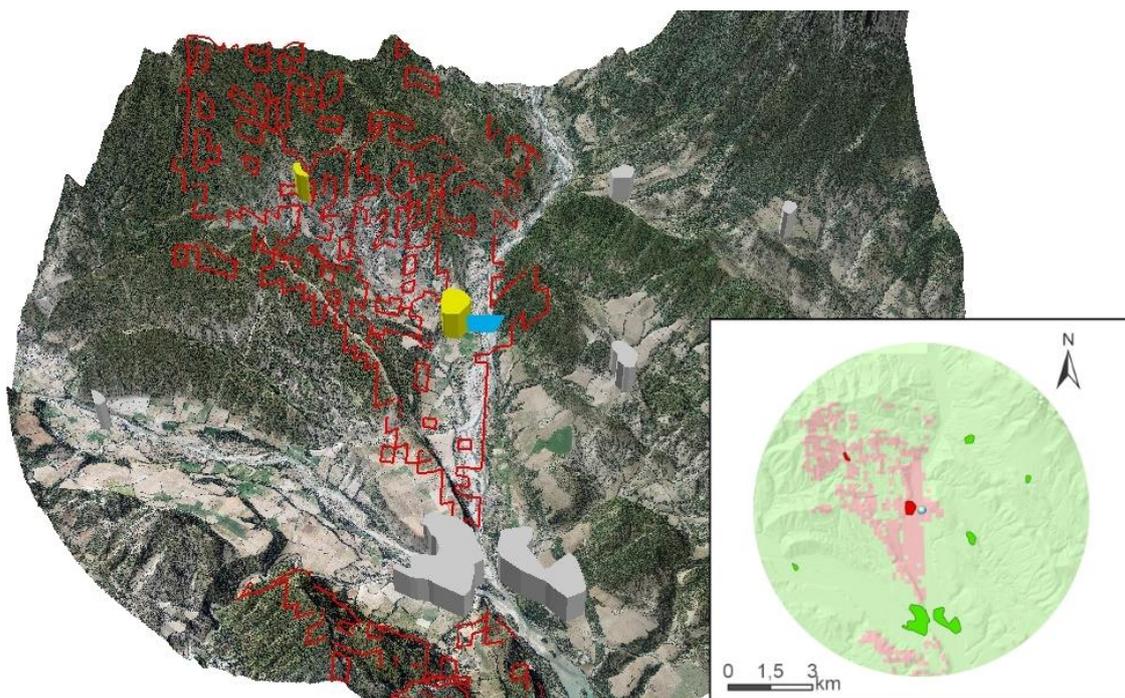


Figura 4.11. Representación de las áreas visibles (marcadas con una línea granate en la figura principal y en color rojo en la auxiliar) desde una cantera de gravas (en azul) en las proximidades de Labuerda (Huesca). Los municipios directamente expuestos a la cantera son marcados en amarillo en la figura principal (y en rojo en la auxiliar), mientras que los aislados por elementos topográficos aparecen en gris (y en verde en la auxiliar).  
Elaboración propia.

Obtenida la población directamente expuesta a la mina en el radio establecido, los puntos inventariados fueron agrupados en cinco categorías según la cuantía de dicha población (Tabla 4.28.). Como puede ser observado, los pesos y el grado de exposición tienen una relación inversa. Por ello, los elementos puntuales que representan yacimientos que no están expuestos a ningún núcleo de población recibieron el valor máximo, disminuyendo el peso conforme aumenta la población expuesta.

Tabla 4.28. Categorías que componen el indicador que analiza el nivel de exposición de los núcleos de población, intervalo de habitantes directamente expuestos incluidos en cada categoría y peso asociado.  
Elaboración propia.

CATEGORÍA	UMBRAL (Nº habitantes directamente expuestos)	PESO
Grado de exposición muy bajo	0	5
Grado de exposición bajo	1 a 99	4
Grado de exposición medio	100 a 999	3
Grado de exposición alto	1.000 a 9.999	2
Grado de exposición muy alto	Más de 10.000	1

#### 4.5.5. Afectaciones de los bosques y de la cubierta vegetal

Este indicador valora, a partir de la información contenida en la base de datos del Mapa Forestal de España (Ministerio para la Transición Ecológica, 2006), el tipo de cubierta vegetal o boscosa que se vería afectada por el desarrollo de una actividad extractiva, empleando diversos criterios como el grado de desarrollo vegetal, la singularidad y el grado de naturalidad o falta de influencia antrópica en su desarrollo. Un bosque natural en una fase madura no es implícitamente mejor o más adecuado que, por ejemplo, un prado o un pastizal artificial, sin embargo, de cara a proteger uno de los dos espacios resulta obvio que el bosque necesitaría un periodo de tiempo muchísimo mayor para poder volver al estado anterior a su modificación, siendo, por tanto, más interesante su designación como elemento digno de ser conservado.

Por todo ello, las categorías generadas para valorar las afecciones a la cubierta vegetal se han establecido a partir de los usos del suelo del territorio, el desarrollo vegetal y la densidad arbórea en terrenos boscosos, el origen natural de los diversos usos del suelo analizados y la presencia de especies poco representadas o que suponen un interés especial de conservación en la C.A. de Aragón. Concretamente, se han establecido cinco categorías diferentes, cuyo valor pondera inversamente el nivel de afectación, otorgándose un peso más elevado a aquellas en las que las afectaciones a la cubierta vegetal por la iniciación de una actividad minera fueran menos importantes. A continuación, en la Tabla 4.29, se sintetizan cada una de las cinco categorías establecidas, incluyendo ejemplos de los usos de suelo incorporados en ellas.

Tabla 4.29. Categorías establecidas para el indicador *Afectaciones de los bosques y de la cubierta vegetal*. Características, ejemplos y peso asignado a cada una de estas categorías. Elaboración propia.

CATEGORÍA	Características	Ejemplos	PESO
Afectación a la cobertura vegetal muy baja	Usos del suelo de origen antrópico	Autopistas, autovías y otras infraestructuras de comunicación, áreas destinadas a la minería, escombreras y depósito de vertidos.	5
Afectación a la cobertura vegetal baja	Vegetación escasa o de origen puramente antrópico	Áreas recreativas, superficies permanentes ocupadas por el agua, parques periurbanos, superficies agrícolas y prados artificiales.	4
Afectación a la cobertura vegetal media	Vegetación superior escasa o áreas donde la superficie vegetal ha sido afectada por la acción humana	Bosque de plantación disperso. Montes sin vegetación superior, pastizales y matorrales, prados, herbazales y superficies forestales temporalmente desarboladas (por incendios o fenómenos naturales).	3
Afectación a la cobertura vegetal alta	Vegetación y espacios de origen natural y bosques de origen artificial con especies de interés especial	Bosque natural disperso. Bosques de plantación con especies poco representadas o protegidas, humedales, monte bajo, matorral, ibones...	2
Afectación a la cobertura vegetal muy alta	Masas boscosas muy densas o con especies poco representadas o protegidas	Bosque denso, bosque disperso con especies poco representadas o catalogadas de interés especial y bosques de plantación muy densos.	1

#### 4.5.6. Restricciones por figuras de protección

Las figuras de protección imponen restricciones a la realización de actividades que puedan perjudicar los objetivos de conservación del patrimonio natural o cultural que persiguen. Por otro lado, las limitaciones al desarrollo de actividades no se aplican con el mismo rigor en todos los regímenes de protección considerados y, además, algunas figuras de protección pueden solaparse con otras, siendo coincidentes en el espacio. Ambos factores deberán ser tenidos en consideración a la hora de desarrollar un índice que valore el grado de restricción al desarrollo de actividades económicas no orientadas a la conservación o la mejora del patrimonio y las áreas protegidas en cada punto del territorio.

El índice que valora el nivel de limitación al desarrollo de actividades económicas está compuesto por cinco categorías puntuadas del 1 al 5, en el que el valor máximo se

corresponde con las áreas donde la actividad minera cuente con menos impedimentos, que en este caso concreto se corresponderá con aquellos espacios en los que no exista ninguna de estas figuras de protección. Encontramos, pues, una relación inversa entre el peso y el nivel de protección del espacio en el que se localiza el yacimiento.

La elaboración del indicador ha seguido dos etapas. En la primera se ha asignado un peso de 1 a 4 a cada una de las figuras de protección descritas en el apartado correspondiente del tercer capítulo de la tesis de acuerdo con los siguientes criterios: las categorías con un nivel de restricción menor se les asignó un valor de 1, 2 a las categorías con niveles de restricción medio y 4 a las que presentan unas mayores limitaciones a la iniciación y desarrollo de actividades mineras (Tabla 4.30.).

Tabla 4.30. Figuras de protección consideradas en el análisis y peso asociado a ellas. Elaboración propia.

Figura de protección	Peso específico
RED NATURA 2000	1
Espacios Naturales Protegidos	
<i>Parque nacional</i>	Ubicación descartable
<i>Parque natural</i>	4
<i>Reservas naturales</i>	2
<i>Monumentos naturales</i>	2
<i>Paisajes protegidos</i>	2
Reservas de la Biosfera	1
Humedales Singulares de Aragón	4
Lugares de Interés Geológico	4
Montes de Aragón	1
Ámbito de Protección de Especies	1
Áreas Críticas	2
Zonas para la Protección de la Avifauna	1
Puntos Singulares, Bienes de Interés Cultural y Árboles Singulares	1

Una vez asignado un peso específico para cada categoría, se procedió al cruce de la información cartográfica relativa a dichas figuras de protección, con el objetivo de determinar la coincidencia espacial de diversos regímenes de protección. La suma de los diferentes pesos específicos de cada categoría, en el caso de que fueran coincidentes en el espacio, determinará el valor final del índice concerniente al grado de limitación derivado de la existencia de figuras de protección. De este modo, si una superficie concreta se halla protegida por, por ejemplo, una Zona de Protección para la Avifauna y una Zona de Especial

Conservación, ambas con un peso específico de 1, esa área contara con un valor final de 2, resultado de la suma de los pesos específicos individuales.

En el caso de los elementos puntuales pertenecientes a la categoría referente a los Puntos Singulares, Bienes de Interés Cultural y Árboles Singulares, se estableció un área de protección de un kilómetro en torno a su ubicación espacial, lo que supone extender a esa área la restricción propia del elemento puntual correspondiente.

La puntuación final de un yacimiento en este criterio resulta de la suma de las puntuaciones de las figuras de restricción correspondientes, aplicando nuevamente un criterio inverso de modo que cuanto mayor sea el resultado de dicha suma, menor será el peso asignado. El peso otorgado a este indicador será mínimo en el caso de yacimientos situados en, o cerca de, lugares con elevadas restricciones como por ejemplo un humedal singular, un Lugar de Interés Geológico o un Parque Natural. En el mismo caso estarían los yacimientos próximos a lugares con una o varias figuras de protección puntuadas con pesos asociados menores. Por el contrario, si un determinado territorio carece de figuras de protección será incluido dentro de la categoría en la que la actividad minera cuenta con menos restricciones y recibirá un valor de 5 en el indicador (Tabla 4.31.).

*Tabla 4.31. Categorías que conforman el indicador que analiza las restricciones por figuras de protección, peso asociado y explicación. Elaboración propia.*

CATEGORÍA	PESO	Explicación
Sin restricciones	5	Ninguna figura de protección asociada. Valor final de la suma de los pesos específicos asignados: 0
Restricción baja	4	Valor final de la suma de los pesos específicos asignados: 1 Una figura de protección de peso menor.
Restricción media	3	Valor final de la suma de los pesos específicos asignados: 2 Coincidencia espacial de dos figuras de protección de peso menor o una de peso medio.
Restricción alta	2	Valor final de la suma de los pesos específicos asignados: 3 Tres figuras de protección de peso menor o una de peso medio coincidente con una de peso menor.
Restricción muy alta	1	Valor final de la suma de los pesos específicos asignados: mayor de 4 Una figura de peso mayor, dos figuras de peso medio, cuatro figuras de peso menor, o sus combinaciones.

#### 4.5.7. Afectaciones del paisaje

Que la minería sea una de las actividades económicas más denostadas por la población por su elevada capacidad para modificar el paisaje y los usos del suelo, a veces, de forma irreversible, justifica la presencia de un indicador que intente analizar los tipos de paisaje que se verían afectados por la apertura de una actividad minera en un determinado territorio y la respuesta que generaría en la población. Para lograr este objetivo, se estudiarán los paisajes que serían damnificados por el inicio de una labor extractiva en torno a cada uno de los puntos que componen el inventario, utilizando parámetros estadísticos objetivos basados en el Mapa de Calidad de Paisaje de Aragón (Dirección General de Ordenación del Territorio, 2015). Los resultados de este análisis podrían predecir, en cierto modo, la respuesta popular ante la minería en cada punto de territorio, al asumir que si las labores extractivas afectan a una zona cuyo valor de calidad de paisaje es muy alto, lo que implica en palabras de los autores de dicho mapa que presentan un mayor mérito para ser conservados, la respuesta de la ciudadanía será de un mayor rechazo que si la actividad afectara a un paisaje de escaso valor.

Antes de comenzar a explicar la metodología seguida para calcular las afecciones paisajísticas derivadas de la apertura de una actividad extractiva en cada uno de los yacimientos e indicios minerales inventariados, es remarcable destacar que según la opinión de algunos expertos en la materia la longitud máxima a la que el ojo humano es capaz de discernir los elementos de mayor tamaño o altura de forma óptima se situaría en torno a los 3 km (Dirección General de Ordenación del Territorio, 2015), siendo esta, por tanto, la longitud básica empleada en los cálculos realizados en los estudios de paisaje.

A pesar de que los yacimientos han sido inventariados como entidades puntuales, en la realidad las labores mineras se extienden por una superficie más o menos amplia. Por eso, para calcular el impacto paisajístico de una hipotética mina en torno a un yacimiento se ha supuesto que todo el terreno en un radio de 3 km alrededor del punto inventariado quedaría visualmente degradado. Como ya se ha comentado, para poder lograr un índice que permita comparar el grado de afectación paisajística se ha utilizado como fuente de información básica el Mapa de Calidad del Paisaje de Aragón. Así, en primer lugar, para cada registro de

la base de datos se determinaron las teselas correspondientes a las diferentes clases de calidad de paisaje dentro del radio de 3 kilómetros definido anteriormente, ponderando cada una de ellas en función del área ocupada mediante la siguiente fórmula:

$$AP_{3\text{ km}} = \frac{\sum_{i=1}^{10} 10^{(1+i*0,15)} * \text{Área}_i}{\pi * (3\text{ km})^2}$$

Donde  $i$  es cada una de las 10 clases de calidad empleadas en el mapa y  $\text{Área}_i$  la superficie que ocupa cada clase. El formato exponencial de la ecuación fue escogido con la intención de que una porción pequeña del territorio con elevada calidad paisajística tuviera un peso mayor que un área extensa pero degradada.

Posteriormente, se repitió el proceso anterior en la corona circular situada entre los 3 y 6 km alrededor del punto inventariado, con la particularidad que en este caso solo se tendrán en cuenta las zonas que son visibles desde ese punto. Este paso, proveerá un nuevo valor que será adicionado al obtenido en la fase anterior, lo que determinará el valor final del índice de afecciones paisajísticas para cada registro inventariado. La fórmula utilizada en este paso se adjunta a continuación:

$$AP_{3-6\text{ km}} = \frac{\sum_{i=1}^{10} 10^{(1+i*0,15)} * \text{Área}_i}{\sum \text{Área}_i}$$

El valor adicionado será, previamente, dividido entre dos, para que sea influyente pero no determinante en el resultado final. El valor final del índice que valora las afectaciones al paisaje vendrá, por tanto, determinado por la fórmula:

$$\text{Índice Afectación Paisajística} = AP_{3\text{ km}} + \frac{AP_{3-6\text{ km}}}{2}$$

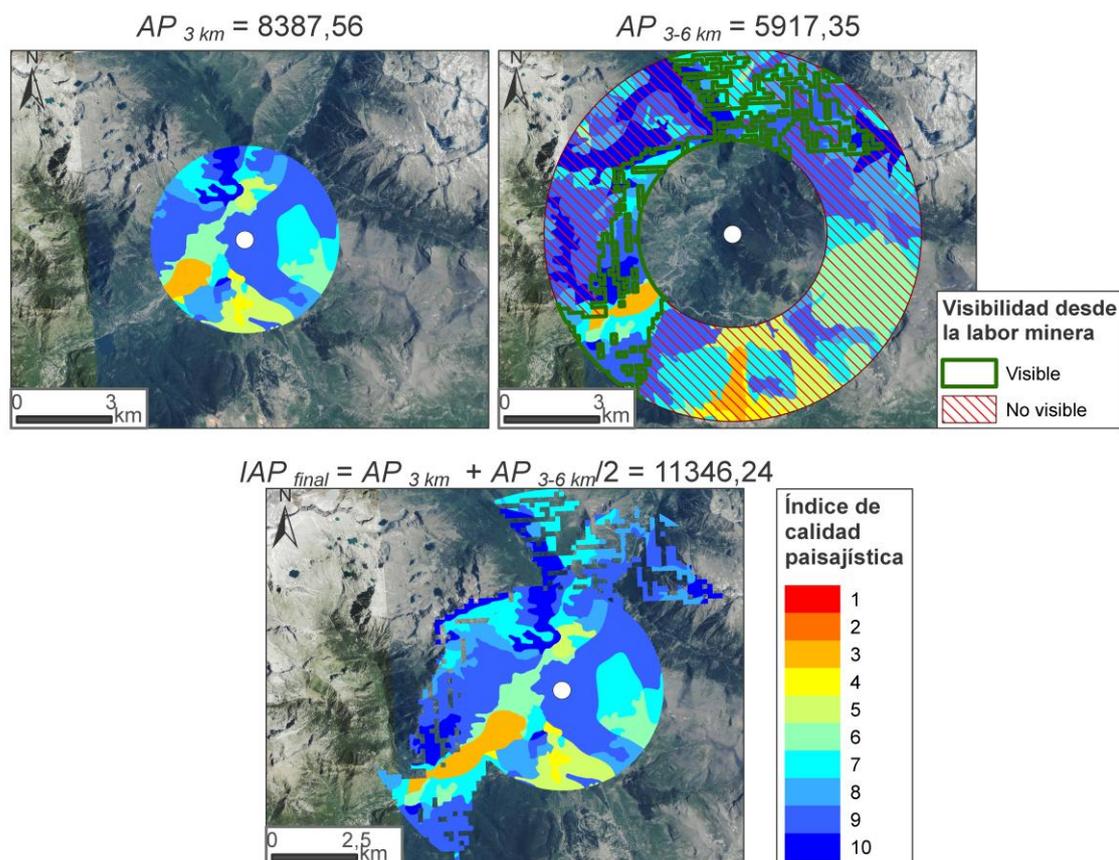


Figura 4.12. Proceso esquematizado de obtención del índice de Afectación Paisajística utilizando como ejemplo un índice de hierro en las proximidades de Benasque (Huesca). Elaboración propia.

El valor referente al índice de *afecciones paisajísticas* obtenido a partir de las formulas precedentes (Figura 4.12.) sirvió para clasificar los yacimientos en 5 categorías diversas. Al igual que las clases establecidas en el resto de indicadores, estas fueron ponderadas con pesos de entre 1 y 5. A aquellos puntos con un valor del índice de afectación paisajística más elevado les fue asignado un peso más bajo y, al contrario, los puntos que recibieron un valor máximo en este indicador fueron aquellos sobre los cuales se generaría una menor afección al paisaje (Tabla 4.32).

Tabla 4.32. Categorías que configuran el indicador afectaciones al paisaje y peso asociado. Elaboración propia.

CATEGORÍA	PESO
Grado de afectación muy bajo	5
Grado de afectación bajo	4
Grado de afectación medio	3
Grado de afectación alto	2
Grado de afectación muy alto o localización en parajes especialmente valorados a nivel local	1

La puntuación mínima también fue otorgada a yacimientos que se localizan en parajes especialmente apreciados por la población local. Es sabido que el paisaje tiene una componente psicológica capaz de evocar sentimientos y recuerdos y reafirmar los vínculos de un individuo con el territorio. Es este mecanismo el que hace que las personas tengan un especial aprecio y apego hacia los paisajes de su propia localidad. Para determinar qué parajes de un municipio poseen un significado especial para sus habitantes fue generado un modelo estadístico que tiene en cuenta las características paisajísticas de los diferentes parajes, así como la presencia de elementos singulares que aumenten la afluencia de visitantes o la posibilidad de desarrollar actividades de ocio en ellos.

El primer paso de este proceso consistió en la subdivisión de la Comunidad Autónoma aragonesa en una cuadrícula de 3 km de lado. A cada uno de los cuadrados que componen dicha cuadrícula les fue aplicada la fórmula explicada en pasos anteriores ( $AP_{3km}$ ), con el objetivo de obtener un valor ponderado de los méritos paisajísticos en función de la superficie que ocupa cada clase de calidad. Cuando los cuadrados localizados en las áreas fronterizas de la región no estaban completamente ocupados, dicho cálculo fue realizado de forma conjunta con la información contenida en alguna de las entidades de la cuadrícula adyacentes.

Una vez obtenido el valor de calidad paisajística para cada uno de los cuadrados, se consultó la información del mapa de paisajes elaborado por el Gobierno de Aragón para verificar la existencia en el territorio de enclaves singulares (fluviales, humedales, biogeográficos, o relacionados con el patrimonio hidráulico o la arquitectura militar y religiosa), que pudieran ser visitados o posibilitaran el desarrollo de actividades de ocio y esparcimiento. En las cuadrículas que albergaban alguno de los enclaves citados, la puntuación por su calidad paisajística fue incrementada.

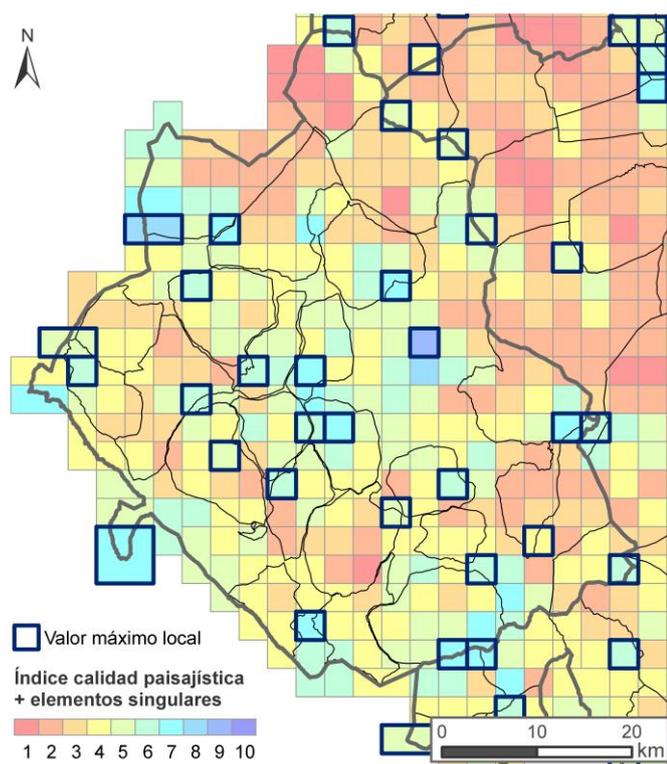


Figura 4.13. Ubicaciones más valoradas dentro de cada municipio a partir del índice calculado. Detalle de la cuadrícula para la comarca de la Sierra de Albarracín. Elaboración propia.

El resultado final de este proceso consistió en un mapa en el que se representaba el valor obtenido por la combinación de la calidad del paisaje y la presencia de enclaves de interés popular en cada una de las cuadrículas. Con el objetivo de proteger los parajes más emblemáticos de cada localidad, se analizó, municipio por municipio la entidad de la cuadrícula con una valoración más elevada presente en cada uno de ellos, la cual, independientemente de su valor cuantitativo será reclasificada en la categoría de interés de protección más alto (Figura 4.13.).

#### 4.6. DISEÑO DEL ANÁLISIS MULTICRITERIO

A modo de resumen, en la Tabla 4.33. se muestran todos los indicadores empleados en cada una de las dimensiones que componen el análisis multicriterio, incorporando el peso relativo asignado a cada una de ellas para los diferentes grupos de recursos. En color rojo se muestran los pesos relativos a la categoría formada por los *minerales metálicos* y los *recursos energéticos*, en marrón los correspondientes a las *rocas y minerales industriales* y a las *rocas ornamentales*, en azul a las *aguas* y en negro el relativo a los *hidrocarburos no convencionales* en la dimensión *Perfil geológico* (en las otras dos categorías este grupo de recursos fue valorado igual que el resto de los *recursos energéticos*).

Tabla 4.33. Dimensiones, indicadores y categorías empleadas en el análisis. Pesos asociados a los indicadores para los diferentes tipos de recursos estudiados y peso asociado a las categorías que componen los indicadores. Elaboración propia

DIM.	INDICADOR	CATEGORÍA
PERFIL GEOLÓGICO	ACTIVIDAD (0,35) (0,35) (1) (-)	En explotación
		Con derechos otorgados o en tramitación
		Potencialmente recuperable
		Indicios minerales
		Descartados
	TAMAÑO (0,3) (0,3) (-) (-)	Grande
		Mediano
		Pequeño
	FORMA DE APARICIÓN (0,1) (0,1) (-) (-)	Principal
		Asociado
	RECURSOS MINERALES ASOCIADOS (0,05) (0,05) (-) (-)	Algún elemento crítico asociado
		Varios elementos asociados de importancia media y/o baja
		Un elemento asociado de importancia media o varios de importancia baja
		Un elemento asociado de importancia baja
	VALOR ESTRATÉGICO (0,2) (0,2) (-) (-)	Ningún elemento asociado
		Muy alto (elementos críticos)
		Alto (importancia económica o riesgo en el suministro muy alto)
		Medio (importancia económica alta)
	ANÁLISIS DEL TOC: CONTENIDO EN CABONO ORGÁNICO (-) (-) (-) (1)	Bajo (importancia económica o riesgo en el suministro medio)
		Muy bajo (importancia económica o riesgo en el suministro bajo)
		Muy bajo (no generadora)
Bajo (pobre)		
APTITUD DEL TERRENO	ADECUACIÓN TOPOGRÁFICA (0,2) (0,2) (0,2)	Medio (regular)
		Alto (buena)
		Muy alto (muy buena)
		Adecuación topográfica óptima
		Adecuación topográfica alta
	CAPACIDAD RECARGA DE ACUÍFEROS (-) (-) (0,4)	Adecuación topográfica media
		Adecuación topográfica baja
		Adecuación topográfica muy baja
		Capacidad de recarga muy alta
		Capacidad de recarga alta
	GENERACIÓN Y DIFUSIÓN DAM Y OTROS TIPOS DE CONTAMINANTES (0,5) (0,3) (0,05)	Capacidad de recarga media
		Capacidad de recarga baja
		Capacidad de recarga muy baja
		Potencial de generación y difusión DAM y otros tipos de contaminación más bajo
		Potencial de generación y difusión DAM y otros tipos de contaminación bajo
Potencial de generación y difusión DAM y otros tipos de contaminación medio		
Potencial de generación y difusión DAM y otros tipos de contaminación alto		
Potencial de generación y difusión DAM y otros tipos de contaminación más alto		

	VULNERABILIDAD FRENTE A EVENTOS NATURALES EXTREMOS (0,3) (0,5) (0,35)	Vulnerabilidad muy baja Vulnerabilidad baja Vulnerabilidad media Vulnerabilidad alta Vulnerabilidad muy alta
INSERCIÓN SOCIOECONÓMICA	RÉGIMEN DE PROPIEDAD (0,075) (0,075) (0,075)	Índice densidad parcelaria + límites administrativos muy bajo
		Índice densidad parcelaria + límites administrativos bajo
		Índice densidad parcelaria + límites administrativos medio
		Índice densidad parcelaria + límites administrativos alto
		Índice densidad parcelaria + límites administrativos muy alto
	ACCESO A LAS INFRAESTRUCTURAS (0,2) (0,2) (0,2)	Accesibilidad muy alta
		Accesibilidad alta
		Accesibilidad media
		Accesibilidad baja
	IMPACTO POTENCIAL EN LA ECONOMÍA LOCAL (0,2) (0,2) (0,3)	El más alto
		Alto
		Medio
Bajo		
El más bajo		
NIVEL DE EXPOSICIÓN DE LOS NÚCLEOS DE POBLACIÓN (0,125) (0,125) (0,075)	Grado de exposición muy bajo	
	Grado de exposición bajo	
	Grado de exposición medio	
	Grado de exposición alto	
	Grado de exposición muy alto	
INSERCIÓN SOCIOECONÓMICA (Continuación)	AFECTACIONES DE LOS BOSQUES Y DE LA CUBIERTA VEGETAL (0,1) (0,1) (0,075)	Grado de afectación muy bajo
		Grado de afectación bajo
		Grado de afectación medio
		Grado de afectación alto
		Grado de afectación muy alto
	RESTRICCIONES POR FIGURAS DE PROTECCIÓN (0,15) (0,15) (0,15)	Sin restricciones
		Restricción baja
		Restricción media
		Restricción alta
		Restricción muy alta
	AFECTACIONES DEL PAISAJE (0,15) (0,15) (0,125)	Grado de afectación muy bajo
		Grado de afectación bajo
Grado de afectación medio		
Grado de afectación alto		
Grado de afectación muy alto o localización en parajes especialmente valorados a nivel local		

Una vez realizada la valoración de cada uno de los indicadores que componen el análisis multicriterio, se obtuvo un valor numérico procedente de la suma ponderada de las puntuaciones conseguidas en cada indicador. Este valor permitirá la asignación de los yacimientos e indicios minerales registrados en la base de datos a tres categorías diferentes

de interés dentro de cada dimensión. Estas categorías de interés, que recibirán la etiqueta de *Alto*, *Medio* y *Bajo*, muestran la mayor o menor adecuación del yacimiento (en el caso de la dimensión geológica) o del territorio que lo alberga (en las otras dos dimensiones) para el desarrollo de una actividad minera ligada a ese yacimiento.

La combinación de estas tres categorías permite conocer el resultado final de potencialidad minera para cada registro del inventario. El cruce de las tres dimensiones estudiadas determina un cubo compuesto por 27 subelementos, como queda reflejado en la Figura 4.14. Estos 27 subelementos fueron reclasificados en tres únicas categorías, que como en el caso de las tres grandes dimensiones en las que se divide el análisis, recibirán la denominación de *potencial (o interés) alto, medio y bajo*.

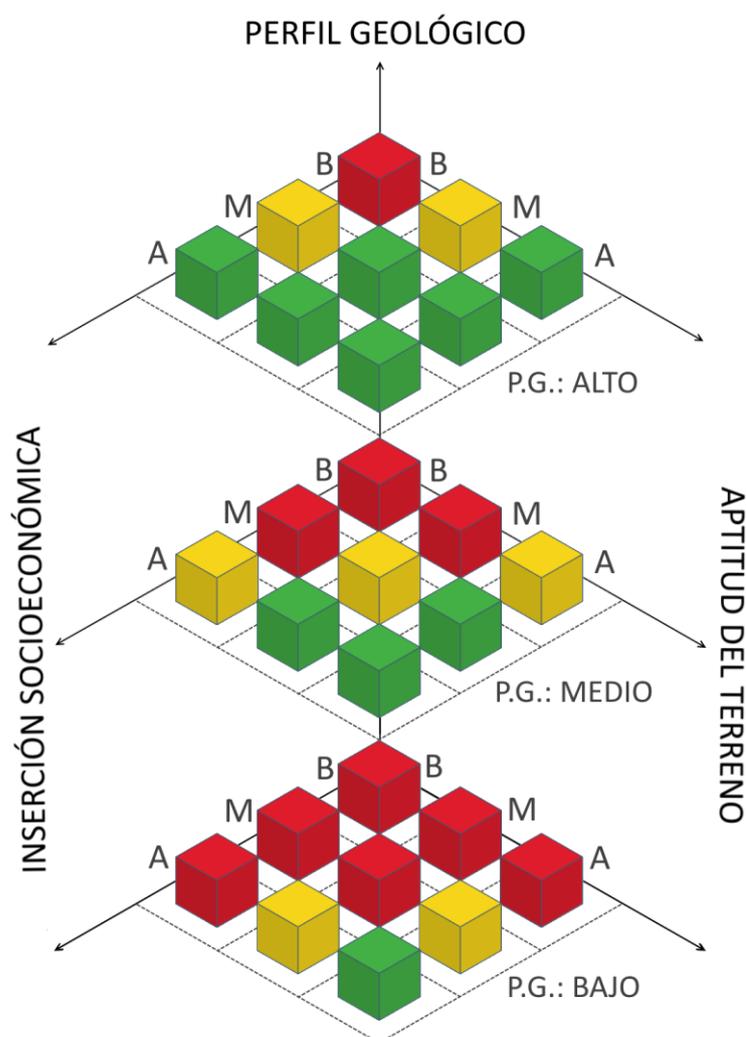


Figura 4.14. Cubo desagregado que muestra las posibles combinaciones de los resultados obtenidos en cada una de las tres dimensiones consideradas en el análisis. Elaboración propia.

La condición relativa al *potencial minero bajo* estará reservada a aquellos yacimientos que hayan sido catalogados con esta misma etiqueta en las tres dimensiones analizadas o en los casos en que dos dimensiones hayan sido valoradas con la etiqueta bajo y una con la de media, dos bajas y una alta o una baja y dos medias. Todas las posibilidades de cruce y la categoría a la que serán asignadas vienen desarrolladas en la Tabla 4.34:

Tabla 4.34. Categorías de potencialidad minera en función del cruce de resultados dimensionales. Elaboración propia.

P. BAJA	P. MEDIA	P. ALTA
BBB	MMM	AAA
BBM	BMA	AAM
BMM		AMM
BBA		AAB

Como ejemplo, supongamos un yacimiento que haya sido clasificado como de interés alto en la dimensión geológica y medio en las otras dos (Figura 4.15.), observando el cubo en el que se representan todos los posibles cruces se observa que la categoría final de potencialidad a la que pertenece dicho yacimiento es la catalogada como *Alta*.

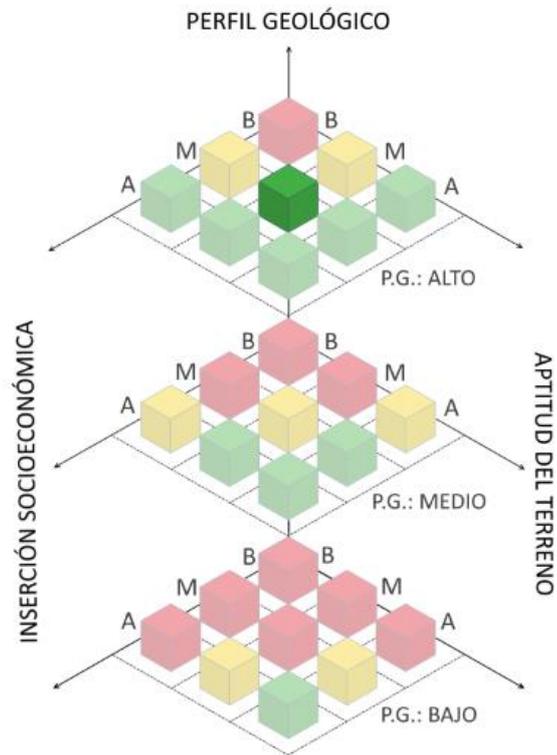


Figura 4.15. Cubo que representa la situación mencionada en el ejemplo. La fracción del cubo que representa la situación descrita, es decir, un interés alto en la dimensión Perfil geológico y medio en la Aptitud del terreno e Inserción socioeconómica, se representa en un color verde más oscuro. Elaboración propia.

# Capítulo V: Herramientas para la generación, análisis y presentación de la base de datos

5.1. El SIG

5.2. Datos y tratamientos cartográficos adicionales para el análisis de las dimensiones *aptitud del terreno e inserción socioeconómica*

5.3. Herramientas auxiliares para la automatización de los análisis y su exportación a otros contextos geográficos

5.4. Compartiendo los resultados

## HERRAMIENTAS PARA LA GENERACIÓN, ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE LA BASE DE DATOS

Exceptuando algunas fases, como la recolección y el tratamiento de muestras ricas en materia orgánica para el análisis de sus propiedades como potenciales rocas madre, las actividades desarrolladas dentro del contexto de esta tesis han involucrado, de una u otra manera, el empleo de diversos tipos de software informático. En muchos de los procesos realizados, por ejemplo en el manejo de los datos en bruto referentes a los derechos mineros extraídos del catastro o en el tratamiento de los resultados a los que fueron sometidos los recursos registrados en la base de datos, fueron empleadas hojas de cálculo (Microsoft Excel).

Sin embargo, son los Sistemas de Información Geográfica (SIG, o GIS, por la abreviatura en inglés de Geographic Information System) las herramientas fundamentales utilizadas en este trabajo. Más concretamente, este tipo de programas han sido empleados en procesos como la creación de la base de datos, los análisis espaciales realizados sobre los puntos inventariados, la generación de toda la cartografía asociada a la tesis o la preparación de la información contenida en la aplicación web que muestra los resultados del proyecto.

En este capítulo serán abordadas ciertas cuestiones técnicas relativas al uso de los SIGs en algunas de las labores desarrolladas durante la tesis, como el tratamiento cartográfico de la información espacial, la generación de herramientas auxiliares para la automatización de las tareas o la producción de cartografía impresa y digital.

## 5.1. El SIG

Existen múltiples definiciones para los Sistemas de Información Geográfica, prácticamente una por cada autor. Para Gooldchild y Kemp (1991) los SIG son un sistema compuesto por hardware, software y procedimientos para capturar, manejar, manipular, analizar, modelizar y representar datos georreferenciados, con el objetivo de resolver problemas de gestión y planificación. Una definición más moderna los considera una tecnología básica, imprescindible y poderosa, para capturar, almacenar, manipular, analizar, modelar y presentar datos espacialmente referenciados. Se trata, por tanto de una categoría dentro de los sistemas de información que se especializa en manejar datos espaciales, con las particularidades y requerimientos que ello conlleva (Moreno Jimenez, 2008). Por último, Lakshmi Steinberg y Steinberg (2015) definen los SIGs como programas informáticos especializados en bases de datos, diseñados para la recolección, almacenamiento, manipulación, recuperación y análisis de datos espaciales.

Aunque no existe una definición unitaria de lo que es un SIG, los expertos coinciden en algunas de sus características esenciales. En primer lugar, los SIGs consisten en una combinación de diversos hardwares y softwares. Por otro lado, para trabajar con los Sistemas de Información Geográfica se necesitan datos, y estos datos deben de poseer una componente espacial. Finalmente, estos sistemas requieren de personas con el conocimiento suficiente para desarrollar las bases de datos y llevar a cabo el procesamiento de la información (Lakshmi Steinberg y Steinberg, 2015).

### 5.1.1. Modelos de datos

ArcGIS, el principal SIG utilizado en la tesis, emplea dos modelos de datos fundamentales para representar la información geográfica: el modelo de datos vectorial y el modelo de datos ráster (ESRI España, 2015d)

El modelo de datos vectorial representa mediante entidades de punto, línea o polígono objetos discretos localizados sobre la superficie terrestre, con unos límites definidos. Los puntos son empleados para representar objetos reales cuyas dimensiones no sean significativas en la escala del estudio. Por ejemplo, las minas, canteras, yacimientos o

indicios incorporados a la base de datos generada han sido simbolizados como entidades puntuales, al tratarse de elementos relativamente poco extensos en un contexto regional. Cuando una de las dimensiones del objeto real es claramente predominante sobre las demás, el elemento será representado mediante entidades lineales (carreteras, ríos, conducciones de gas, petróleo o electricidad, etc.), mientras que los polígonos o elementos superficiales serán utilizados para modelar objetos reales de suficiente extensión. Mediante este tipo de elementos fueron simbolizados aspectos de territorio como los usos del suelo, las figuras de protección medioambiental, las presas y embalses o las *teselas* que categorizan la calidad del paisaje aragonés.

Cada objeto real del territorio estará representado en el SIG por dos entidades del sistema (ESRI España, 2015e): la entidad gráfica de tipo puntual, lineal o superficial, apenas analizada, y una entidad alfanumérica, consistente en una tabla en cuyos campos se registran las propiedades del objeto representado. Así, los datos contenidos en el Sistema de Información Geográfica estarán formados por una entidad con una información espacial definida por uno o varios pares de coordenadas y por la información alfanumérica asociada.

Entre los diversos elementos que componen el modelo vectorial se establecen relaciones topológicas, es decir, interacciones espaciales de adyacencia, conectividad, superposición, etc. ArcGIS incorpora herramientas que permiten modelar estas relaciones espaciales entre los diferentes elementos vectoriales pertenecientes a una o varias capas del modelo generado, y que serán muy importantes, por ejemplo, a la hora de crear redes de transporte, imponiendo que exista coincidencia espacial entre los elementos lineales que representan las carreteras, o para asegurar la integridad de los datos empleados en los diversos análisis, impidiendo la superposición de polígonos o evitando la existencia de huecos entre ellos.

El modelo ráster, por su parte, reproduce la realidad discretizando el espacio en forma de una malla reticular compuesta por pequeñas celdas, en las que cada una de ellas contiene un valor numérico que representa el valor de la variable espacial representada (ESRI España, 2015c). El tamaño de las celdas determina la resolución del mapa generado. El modelo ráster ha sido empleado para representar datos continuos, como la elevación sobre el nivel del mar o la pendiente.

### 5.1.2. Herramientas de análisis espacial y geoprocésamiento

Las posibilidades de los Sistemas de Información Geográfica, así como sus campos de aplicación son muy amplios y variados. Entre estas aplicaciones se encuentran servicios como la generación de cartografía automatizada, la gestión de infraestructuras, del territorio, de factores medioambientales, de equipamientos sociales o de recursos geológicos y mineros, entre muchas otras.

En gran parte, son las herramientas de análisis espacial y geoprocésamiento las que diversifican los campos en los que SIGs pueden ser empleados. Según ESRI España (2015d) ambos términos son asimilables pero no iguales. El análisis espacial extrae o crea nueva información a partir de los datos geográficos disponibles, ayudando a resolver problemas y responder preguntas referentes al mundo real. Por el contrario, las herramientas de geoprocésamiento manipulan los datos de entrada, realizando una modificación en los mismos, obteniendo como salida una nueva clase de entidad.

ArcGIS incorpora múltiples herramientas de geoprocésamiento básicas, ofreciendo la posibilidad de que el usuario genere nuevos modelos complejos a través de utilidades como ModelBuilder, o incluso, la creación de nuevas herramientas de geoprocésamiento más o menos complejas mediante la introducción de un código en la consola de Python. Esta última utilidad fue empleada en la tesis en la generación de la circunferencia que envolvía completamente las labores mineras en explotación, con el objetivo de determinar el área dibujada por dicha circunferencia. La metodología seguida para ello fue ya analizada en el segundo apartado del Capítulo III *“Consideraciones complementarias: El tamaño de las explotaciones mineras y sus implicaciones metodológicas”*.

### 5.1.3. Exportación de los resultados

ArcGIS ofrece la posibilidad de compartir los resultados obtenidos de formas diversas. Las modalidades empleadas para compartir los datos empleados en esta tesis y los resultados derivados del tratamiento de los mismos están relacionadas con la creación de mapas web, gracias a la extensión online de ArcGIS, así como la opción que permite exportar los mapas

generados en formato de imagen o en PDF. Ambas modalidades serán exploradas en el quinto apartado de este capítulo, denominado *Compartiendo los resultados*.

La generación de mapas web en ArcGIS online fue fundamental para la creación de la aplicación web que muestra los resultados obtenidos en el proyecto, como se analizará en el apartado correspondiente<sup>19</sup>.

## **5.2. DATOS Y TRATAMIENTOS CARTOGRÁFICOS ADICIONALES PARA EL ANÁLISIS DE LAS DIMENSIONES APTITUD DEL TERRENO E INSERCIÓN SOCIOECONÓMICA**

En la ejecución de los análisis propuestos para la determinación del interés minero de los elementos inventariados, así como para la elaboración de los mapas incorporados en la tesis, ha sido necesaria la utilización de una gran cantidad de datos cartográficos auxiliares. Esta información procede de diversos Geoportales, Infraestructuras de Datos Espaciales y otros portales web, o bien fue digitalizada manualmente en los casos en los que fue necesario. Estos datos cartográficos auxiliares fueron utilizados directamente en algunas ocasiones, aunque en la mayoría de los casos necesitaron de un cierto tratamiento de mejora o de transformación para adecuarlos a las necesidades contextuales del análisis, o para obtener ciertos subproductos derivados.

En los próximos apartados se analizarán los tratamientos a los que fueron sometidos los datos de tipo cartográfico empleados en la ejecución de los análisis hasta lograr ajustarlos a las necesidades específicas requeridas en el estudio, así como los subproductos obtenidos a partir de la información básica. Hay que destacar que solo los indicadores destinados a la evaluación de las dimensiones denominadas *Aptitud del terreno e Inserción socioeconómica*, donde se estudian las características del territorio y lo que hay sobre él, emplearán información cartográfica auxiliar. En la dimensión geológica, por el contrario, los datos son propios del yacimiento y del elemento en el contenido y totalmente independientes del territorio y sus características. Por último, advertir de que, en ocasiones, los datos auxiliares

---

<sup>19</sup> Una versión embrionaria de esta aplicación fue desarrollada como Trabajo de Fin de Máster para el Máster SIG de Esri España. Esta primera versión sufrió numerosas variaciones para ser adecuada a las necesidades de esta tesis.

de tipo cartográfico son transversales a varios de los indicadores y la información empleada en su resolución.

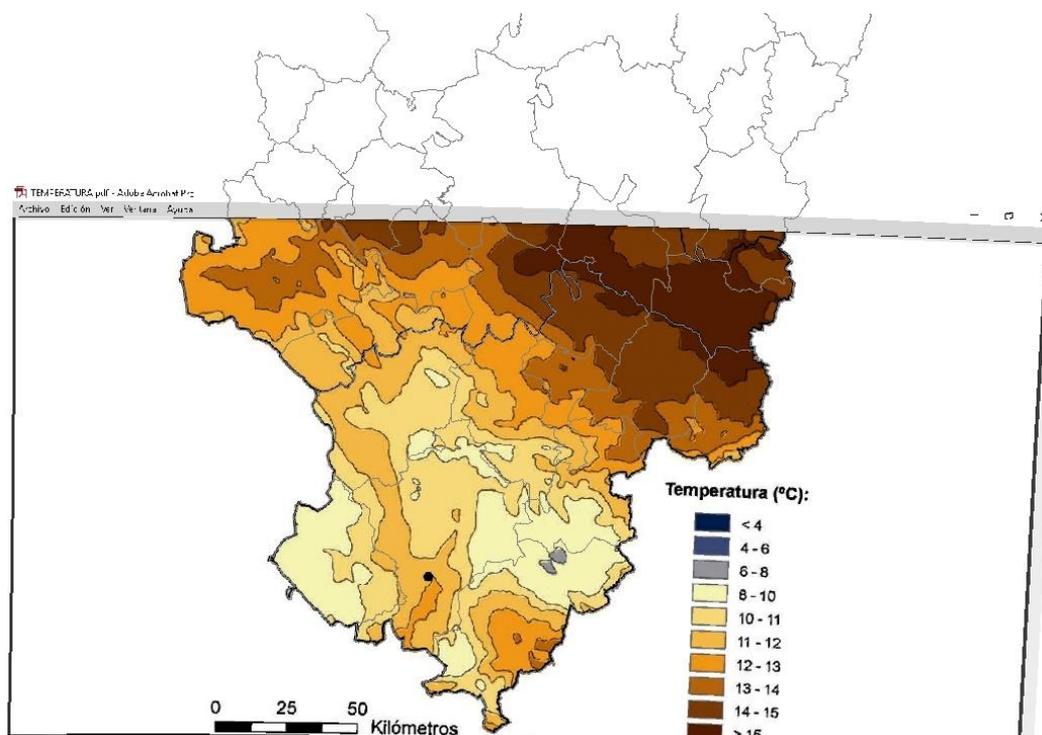
### 5.2.1. Tratamientos para indicadores de la dimensión *Aptitud del terreno*

Como se ha comentado, no todos los datos geográficos empleados en el cálculo de los indicadores establecidos en esta dimensión requerirán de un tratamiento cartográfico adicional para su uso. En este apartado se explicarán los problemas relacionados con la información directa obtenida desde las diversas fuentes, así como el modo de solucionarlos. Por otro lado, algunas de las operaciones realizadas son comunes a varios de los productos empleados o necesarios para el cálculo de diferentes indicadores, incluso pertenecientes a dimensiones distintas.

#### 5.2.1.1. Digitalización de información disponible en formato de imagen

Parte de la información necesaria para la construcción de las herramientas empleadas en la resolución de los diversos indicadores se encontraba disponible en un formato de imagen sin georreferenciar. Será, por tanto, necesaria su transformación en una capa de información asimilable al resto de datos empleados.

Una de las fuentes que ofrece la información en un formato diverso al del resto de datos empleados es el Atlas Climático de Aragón. Este atlas se encuentra disponible para su consulta en el portal de Desarrollo Rural Sostenible del Gobierno de Aragón, en la forma de texto e imágenes. La información en el atlas contenida no está disponible en un formato que permita su utilización directa en un SIG. De este modo, para que pueda ser empleada en los análisis llevados a cabo en el software tendrá que ser georreferenciada, es decir, se deberán otorgar coordenadas a los datos ofrecidos como imagen. Para llevar a cabo este proceso, se tomará como punto de partida la imagen del mapa de temperaturas medias disponible en el atlas. Esta imagen (en realidad un trozo de ella, puesto que fue transformada por partes) se incorporó al SIG y, mediante las herramientas de geoprocésamiento, se colocó en la posición espacial que le corresponde (Figura 5.1.).



*Figura 5.1. Proceso de georreferenciación de parte de la imagen del Atlas Climático de Aragón correspondiente al mapa de temperatura media anual. Elaboración propia.*

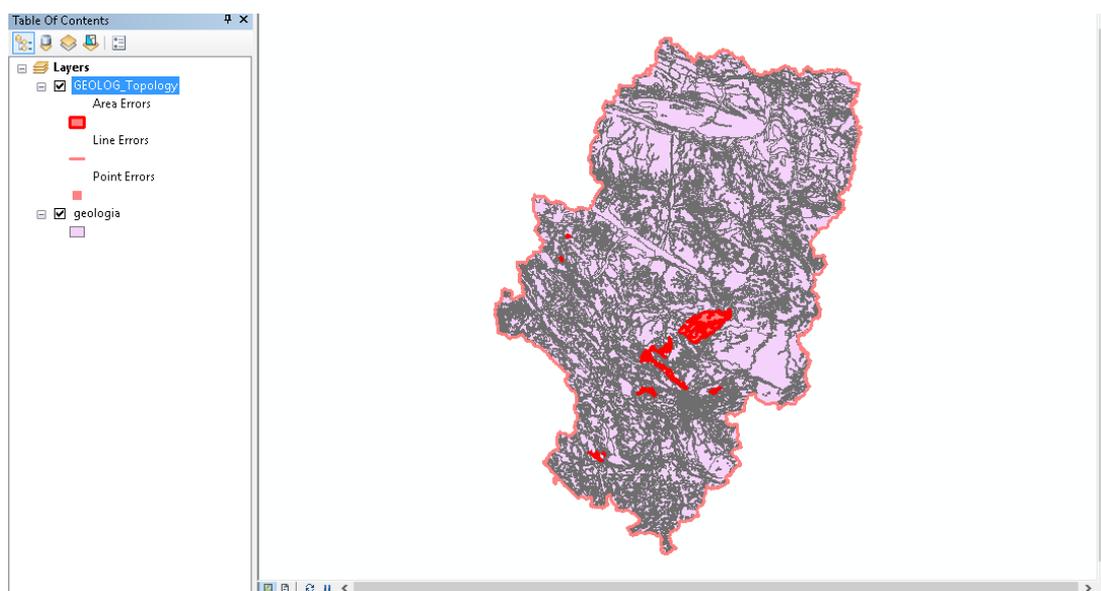
Una vez que las diferentes imágenes en las que se dividió el mapa de temperatura media anual fueron ubicadas espacialmente en el lugar correcto, puedo digitalizarse manualmente la información en ellas localizada. Este proceso fue repetido para los mapas de precipitación media anual y precipitación máxima registrada en 24 horas, disponibles también en esta misma fuente.

Al igual que ocurría con los parámetros climáticos, no se localizó ninguna clase de entidad cartográfica que representara la distribución de los suelos en toda la Comunidad Autónoma de Aragón. En la página web del grupo de investigación iARasol, que estudia y clasifica los suelos de Aragón, sí que presentan un mapa de suelos para la región aunque en formato imagen. Como ocurrió con los mapas del atlas climático, esta información fue georreferenciada y digitalizada manualmente. También el mapa de riesgo sísmico fue digitalizado manualmente a partir del Mapa de Peligrosidad Sísmica de España elaborado por el Ministerio de Fomento en el año 2015, limitando su extensión a la Comunidad Autónoma de Aragón.

Por otro lado, algunos de los Bienes de Interés Cultural y de los Árboles singulares empleados en el indicador referente a las restricciones a la minería por la existencia de figuras de producción, fueron digitalizados manualmente a partir de los catálogos de datos correspondientes.

#### 5.2.1.2. Análisis topológicos

Para asegurar la integridad de los datos procedentes de las numerosas fuentes empleadas se realizó un análisis topológico de los mismos. Este análisis examina las relaciones espaciales existentes entre todas las entidades que componen la capa. En concreto, se estudió si los objetos almacenados se superponían espacialmente, o si por el contrario existían huecos entre ellos sin información.



*Figura 5.2. Análisis topológico de la capa referente a la litología de la región. Los errores topológicos aparecen marcados en color rojo. Elaboración propia.*

Una vez ejecutado el análisis topológico, si este reveló la existencia en algunas áreas de varias entidades superpuestas o la presencia de pequeños espacios sin información, se procedió a su progresiva corrección hasta conseguir que las relaciones espaciales entre las diferentes entidades que componen la capa fuesen las correctas.

Además de la correspondiente a la litología (Figura 5.2.), las clases de entidad contenedoras de la información sobre la permeabilidad del terreno, el riesgo de inundación,

el riesgo por colapso y el riesgo por vientos fuertes también debieron ser sometidas a un proceso de corrección topológico para optimizar la calidad de los datos.

#### 5.2.1.3. Simplificación de la información

El Mapa de Susceptibilidad de Movimientos de Ladera ofrecido por la Infraestructura de Datos Espaciales de Aragón muestra un nivel de detalle demasiado elevado como para poder ser utilizado en un estudio a nivel regional. Por ello, fue necesario someterlo a un proceso de depuración de la información contenida, en el que las *teselas* más pequeñas fueron eliminadas, incorporándolas a las categorías adyacentes. De este modo se perdió cierto nivel de detalle en la información, pero facilitó su utilización en los análisis.

#### 5.2.1.4. Unión de información en formato tipo ráster y generación de subproductos

El indicador que valora el grado de exposición de los núcleos de población a la potencial actividad minera, perteneciente a la dimensión *Inserción socioeconómica*, incorpora un análisis de visibilidad, lo que hace imprescindible disponer de un modelo digital del terreno que contenga datos sobre la elevación sobre el nivel del mar en cada punto del territorio. Este archivo deberá cubrir, no solo la totalidad de la comunidad aragonesa, sino también sus proximidades. No en vano, existen núcleos de población localizados a menos de 5 km de la frontera aragonesa que, según los criterios manejados en el análisis (apartado IV de la tesis), podrían quedar expuestos ante una potencial actividad minera iniciada dentro de la C.A. de Aragón, y que tendrán que ser también tomados en consideración.

La materia prima para la elaboración del modelo de elevación empleado en los análisis deriva de los Modelos Digitales del Terreno MDT200, caracterizados por un paso de malla de 200 m, individuales para cada provincia y disponibles en el portal del Instituto Geográfico Nacional. Por su parte, los Modelos Digitales de Elevación para el sur de Francia fueron obtenidos de la *U.S. Geological Survey* (USGS, s. f.). El modelo de elevaciones final surgió de la unión de los MDT200 de las 9 provincias españolas (3 aragonesas más 6 limítrofes) y los que cubrían el territorio francés. Posteriormente, y para que resultara más manejable, fue recortado dejando un margen de 6 km alrededor de la frontera aragonesa (Figura 5.3.).

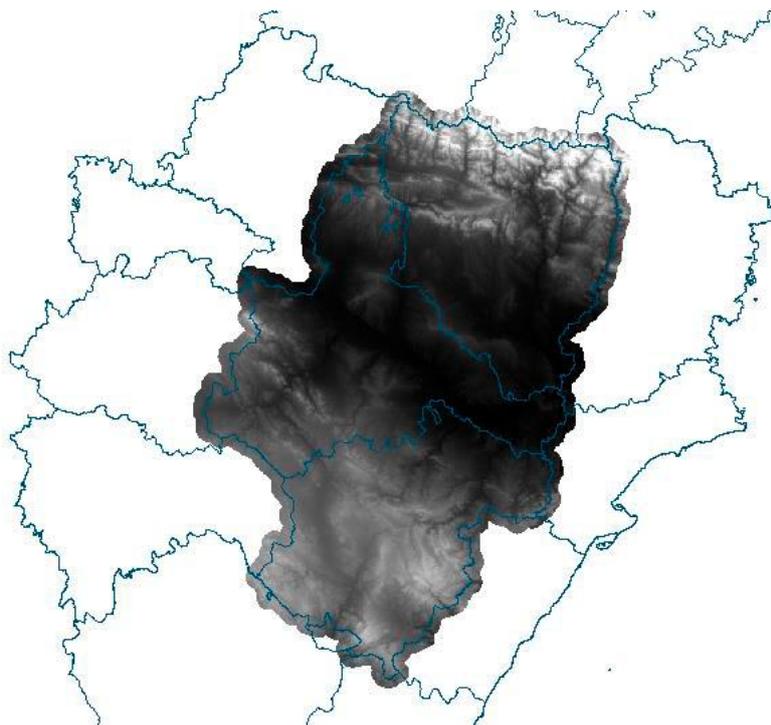


Figura 5.3. Modelo digital de elevación empleado en indicadores como las afectaciones a la población y al paisaje. Elaboración propia.

Por otro lado, en el análisis de las características del relieve en el que se ubica cada elemento del inventario será necesario disponer de la información que almacena la pendiente en cada punto del territorio. Esta capa va a estar íntimamente relacionada con la analizada en los párrafos previos, puesto que ha sido generada como un subproducto de la que contiene los datos de elevación. A partir de este archivo y, mediante la herramienta *Slope* de ArcGIS, se generó el mapa de pendientes para la región.

#### 5.2.2. Tratamientos para indicadores de la dimensión *Inserción socioeconómica*

Algunos de los indicadores que valoran la *inserción socioeconómica* del yacimiento en el territorio emplean como información de entrada datos comunes a la dimensión *Aptitud del terreno*. Es por esto por lo que en los siguientes subapartados solo serán analizados los tratamientos exclusivos realizados para los datos cartográficos auxiliares empleados en esta dimensión.

### 5.2.2.1. Unión de datos vectoriales

En ocasiones, la información necesaria para la resolución de los indicadores procede de fuentes diversas. Quizás el caso de los datos referentes a la división en parcelas del territorio sea el más representativo. La Infraestructura de Datos Espaciales de Aragón ofrece los datos de parcelación del territorio aragonés correspondiente al Sistema de Información Geográfica de la Política Agrícola Común (SIGPAC), para el año 2017 (Figura 5.4.). Esta información se encuentra disponible a nivel de municipio, por lo que las clases de entidad correspondientes a cada localidad tuvieron que ser descargadas de forma individual.

Para los municipios no pertenecientes a la Comunidad Autónoma de Aragón, pero cuya extensión se localiza total o parcialmente en un margen de 1,3 km entorno a la frontera aragonesa (esta distancia deriva del análisis explicado en el apartado 3.2.3 de la tesis), los datos de parcelación fueron obtenidos de la cartografía rústica a nivel municipal de la Sede Electrónica del Catastro (Ministerio de Hacienda, Gobierno de España). En concreto, y para que el producto fuera asimilable al empleado para los municipios aragoneses, fueron seleccionadas las subparcelas de cultivo.



Figura 5.4. Ejemplo de la capa de parcelación procedente del SIGPAC en el término municipal de Monreal del Campo (Teruel). Elaboración propia.

El mayor problema asociado con el procesamiento de las capas contenedoras de la información sobre la parcelación a nivel municipal fue el enorme número de entidades que contenían. Solo en un municipio no muy extenso como Valacloche, en Teruel, se contabilizan casi 3.000 parcelas. Uno grande, como Belchite (Zaragoza), supera las 20.000, mientras que en el municipio más extenso de Aragón, el término municipal de la ciudad de Zaragoza, existen registradas más de 52.000 parcelas. El proceso de unión de las capas que contenían la información a nivel municipal en una única clase de entidad fue temporalmente muy costoso debido al gran número de elementos que debían ser integrados.

En otras ocasiones, el producto empleado, a pesar de proceder de una única fuente, se encontraba dividido a nivel provincial, por lo que fue necesaria su unión en una única capa de información geográfica. Sirvan como ejemplos de esta situación el Mapa Forestal de España (Ministerio para la Transición Ecológica, 2006) o los datos procedentes de la *Base Cartográfica Nacional a escala 1:200.000* (Instituto Geográfico Nacional, 2011).

#### 5.2.2.2. Actualización de los datos existentes

Los datos referentes a la distribución de los núcleos de población en el territorio aragonés fueron obtenidos de la *Base Cartográfica Nacional a escala 1:200.000*, ofrecida por el Instituto Geográfico Nacional. Entre la información asociada a los polígonos empleados para simbolizar los núcleos de población se encuentran aspectos como el nombre, si el núcleo de población es la capital del municipio dentro del que se localiza, si el núcleo se encuentra habitado o deshabitado, así como la población total censada. Sin embargo, la información referente al número de habitantes de cada núcleo procede del censo de 2009, por lo que se consideró necesario actualizar estos datos antes de iniciar la etapa de análisis.

El Instituto Aragonés de Estadística, fuente empleada para la actualización de los datos de población referentes a esta región, ofrece en su portal información sobre las cifras oficiales de población del censo año a año desde 1996. Esta información, desafortunadamente, se encuentra recogida a nivel municipal, sin distinguir cómo se distribuye esta cifra en el caso de que el municipio este compuesto por varios núcleos poblados. Para solventar este contratiempo, en aquellos municipios compuestos por varios núcleos poblacionales se utilizaron las Fichas territoriales de Estadística Local de Aragón (IAEST, 2019), en las que se

adjunta una relación de unidades poblacionales con el número de habitantes de cada una de ellas (Figura 5.5.). Este proceso resultó una tarea ardua, pero que optimizó y actualizó el producto original.

Una vez recolectados y actualizados los datos para las tres provincias aragonesas se procedió a su unión en una única capa. Por otra parte, hay que considerar también el hecho de que los impactos de la potencial actividad minera, tanto los positivos como los negativos, puedan extenderse más allá de la región aragonesa por otras Comunidades Autónomas, e incluso abarcar sectores del país galo. De este modo se consideró necesario conseguir información referente a los núcleos de población localizados en las provincias limítrofes con el territorio aragonés, empleando para ello la misma fuente que en el caso de Aragón, es decir, la BCN200. Para efectuar la actualización de los datos relativos al número de habitantes se acudió a los respectivos institutos de estadística regionales (Estadística de Castilla y León, 2015; Instituto de Estadística de Castilla-La Mancha, 2015; Instituto de Estadística de Cataluña, 2016; Instituto de Estadística de La Rioja, 2015; Instituto de Estadística de Navarra, 2015; Portal Estadístico de la Generalitat Valenciana, 2015).



**Aliaga**



<b>Territorio</b>		
<b>Relación de unidades poblacionales</b>		
Clasificación	Denominación	Población
<b>1.- Municipio</b>	<b>Aliaga</b>	<b>348</b>
2.- Entidad singular	Aldehuela	21
4.- Diseminado	*Diseminado*	21
2.- Entidad singular	Aliaga	268
3.- Núcleo	Aliaga	250
4.- Diseminado	*Diseminado*	18
2.- Entidad singular	Campos	12
3.- Núcleo	Campos	12
2.- Entidad singular	Cañadilla (La)	6
3.- Núcleo	Cañadilla (La)	6
2.- Entidad singular	Cirujeda	15
3.- Núcleo	Cirujeda	15
2.- Entidad singular	Santa Bárbara	26
3.- Núcleo	Santa Bárbara	26

Fuente: Nomenclator del Padrón municipal de habitantes, 1-1-2017. IAEST

Figura 5.5. Relación de unidades poblacionales englobadas dentro del municipio de Aliaga (Teruel). Fuente: Fichas territoriales de Estadística Local de Aragón (IAEST).

Para los municipios franceses localizados en la zona fronteriza no se localizó ningún archivo libre que mostrara la distribución de los núcleos de población a la escala requerida. Por ello, se generó un área de influencia provisional de 30 minutos a partir de los puntos

fronterizos de las diferentes vías de comunicación que conectan Aragón con las regiones francesas de Nueva Aquitania y la actual región de Occitania. El objetivo fue la digitalización manual del perímetro de aquellas entidades poblacionales francesas que podrían llegar formar parte de un área de influencia de 25 minutos a partir de cualquier punto localizado dentro de la geografía aragonesa. Los datos de población de los núcleos galos se obtuvieron del *INSEE*, para el año 2013 (Institut national de la statistique et des études économiques, 2015).

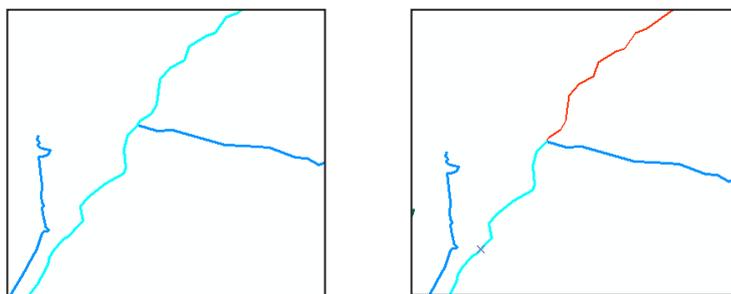
#### 5.2.2.3. Generación de un Dataset de Red (*Network Dataset*)

Para poder generar las áreas de influencia determinadas por un tiempo de recorrido de 25 minutos, necesarias en los análisis relacionados con los indicadores que pretenden determinar el *impacto potencial en la economía local* y el *acceso a las infraestructuras*, será imprescindible contar con un *Network Dataset*. Se trata de un tipo de archivo empleado por los SIGs para modelar redes de transporte, generados a partir de entidades simples de líneas y/o puntos y giros (ESRI España, 2015a), siendo su aplicación más común la de organizar flujos en redes de carreteras. Estos modelos son empleados en los Sistemas de Información Geográfica para realizar muchos tipos de análisis, entre los que destacan la resolución de rutas, el cálculo de áreas de influencia o la localización de la ubicación más cercana.

Para la creación del *Network Dataset* que modele las vías de transporte aragonesas y de regiones limítrofes, será necesario contar con una capa que contenga la red de carreteras diferenciadas por categorías, ya que de ello dependerán los tiempos de conducción. Estos datos fueron tomados de la Base Cartográfica Nacional para las tres provincias aragonesas y las 9 limítrofes localizadas dentro del territorio nacional. Las vías francesas fueron conseguidas en la web MapCruzin.

Una vez que la información relativa a las vías de comunicación de las diferentes provincias españolas y del territorio francés fueron unidas en una única capa, para asegurar la integridad de los datos de cara a la construcción del *Dataset de Red*, se utilizó una herramienta denominada *Integrate*, que comprueba la coincidencia geométrica entre todos los elementos presentes en la capa. También, para asegurar la conectividad entre todos los elementos que constituyen la red de carreteras se empleó la herramienta para *Planarizar*

*líneas* (Figura 5.6.) que añade nodos y conexiones a todas las intersecciones entre carreteras.



*Figura 5.6. Introducción de un nodo de conexión en la intersección de dos vías de comunicación mediante la herramienta Planarizar línea. Elaboración propia.*

Además, en los casos en los que el yacimiento o indicio inventariado se localizaba muy alejado de las vías recogidas por los autores de las fuentes empleadas, se digitalizaron manualmente aquellos caminos y sendas forestales necesarios para realizar el análisis espacial desde esos puntos concretos (Figura 5.7.).



*Figura 5.7. Digitalización de forma manual de caminos no existentes en la BCN. Elaboración propia.*

Por otro lado, como la red que va a ser generada se empleará en la determinación de áreas de influencia basadas en el tiempo, a la hora de crear el modelo de red será necesario contar con un atributo que calcule el tiempo invertido en atravesar cada una de las entidades que componen dicha red. Para ello, a cada tipo de vía de comunicación le fue asignado un valor de velocidad media. La longitud de cada tramo de la red dividida entre la

velocidad media fijada para cada carretera permitirá conocer el tiempo necesario para atravesar ese tramo concreto. Este valor, registrado como información asociada a cada una de las secciones que forman la red, será el que emplee el SIG para generar rutas y áreas de influencia basadas en el tiempo.

### 5.3. HERRAMIENTAS AUXILIARES PARA LA AUTOMATIZACIÓN DE LOS ANÁLISIS Y SU EXPORTACIÓN A OTROS CONTEXTOS GEOGRÁFICOS

El gran volumen de elementos registrados dentro de la base de datos hizo indispensable la automatización de los procesos de análisis. Por ello, se tornó necesaria la creación de unas herramientas de geoprocésamiento, las cuales, una vez introducida la capa contendora de los elementos a analizar, los criterios de valoración deseados y los datos cartográficos auxiliares, realizaran los análisis de forma que se obtuvieran los resultados deseados de forma automática.

ArcGIS presenta una utilidad que permite elaborar modelos complejos compuestos por varios geoprocésamientos conectados que facilitan la automatización de los análisis. Esta utilidad, denominada *ModelBuilder*, posibilita generar y compartir herramientas de análisis complejas, permitiendo definir como parámetros tanto las variables como los datos de entrada y salida, permitiendo, de esta forma, la reutilización de la herramienta con distintas fuentes de datos y valores de variables (ESRI España, 2015b).

La generación de modelos mediante ModelBuilder es visual e intuitiva. En su interfaz deben de ser incorporados los datos de entrada, los geoprocésamientos que se deban aplicar y las variables a considerar, conectando los diferentes elementos siguiendo una secuencia lógica (Figura 5.8.).

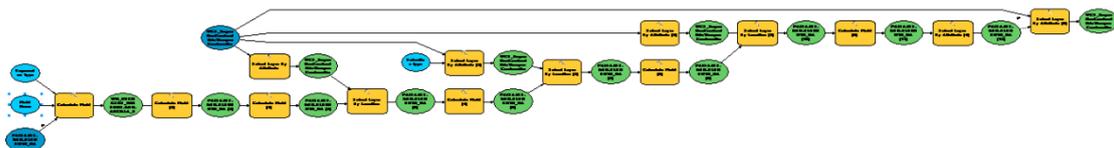


Figura 5.8. Ejemplo de modelo creado con ModelBuilder en el que los datos de entrada vienen simbolizados mediante elipses de color azul oscuro, las variables del modelo con elipses azul claro, las herramientas de

*geoprocesamiento con rectángulos amarillos y los resultados de los procesos con elipses verdes. Elaboración propia.*

Los datos de entrada, tanto los que serán sujeto de análisis como los auxiliares podrán ser seleccionados como parámetros de modelo (Figura 5.9.), es decir, parámetros que aparecen en el cuadro de diálogo de la herramienta (ESRI España, 2015f).

La facultad de las herramientas creadas para consentir la modificación de los datos de entrada, los datos auxiliares del análisis y las variables empleadas en la valoración, permitirá el uso de estas mismas herramientas en otros contextos geográficos. Con ello se logrará uno de los objetivos planteados al comienzo del proyecto, es decir, la generación de un paquete de herramientas oportuno para la exportación de la metodología de análisis a otros territorios, minimizando, de este modo, los tiempos de trabajo generales.

Una de las posibilidades más interesantes de ModelBuilder es el uso de iteradores. La iteración, es decir, la repetición de un proceso varias veces de forma automática, es muy importante al poder mecanizar tareas repetitivas, reduciendo el tiempo y el esfuerzo requerido para llevarlas a cabo (ESRI, 2016b). El uso de iteradores evitará tener que repetir todos los procesos de análisis para la valoración de cada uno de los diferentes elementos recogidos en la base de datos. El tipo de iterador empleado en la mayor parte de los modelos creados coincide con el denominado *Iterate Row Selection*, que ejecuta el modelo de forma progresiva utilizando como entrada cada yacimiento o indicio registrado en la base de datos individualmente.

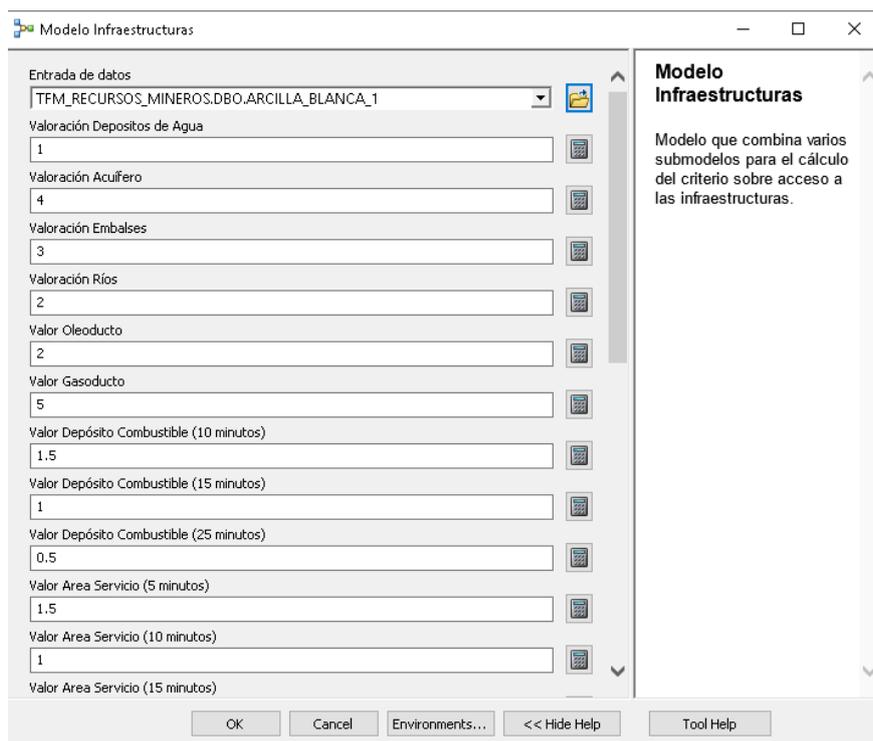


Figura 5.9. Ejemplo de herramienta generada mediante ModelBuilder para el cálculo del indicador Acceso a las infraestructuras. Elaboración propia.

Todas las utilidades generadas fueron incorporadas a una caja de herramientas (Figura 5.10.). En concreto, se creó un modelo para la valoración de cada uno de los indicadores propuestos, así como uno que resolviera la categoría a la que pertenece según su interés en cada una de las dimensiones, uno para la resolución del valor de potencial final y finalmente, uno que estableciera la simbología adecuada para su representación cartográfica. Algunos de los modelos generados son muy simples, coincidiendo con aquellos indicadores en los que la valoración se realiza de forma inmediata, y otros muy complejos, compuestos por numerosos submodelos, en los que fue necesaria la incorporación de más de un iterador.

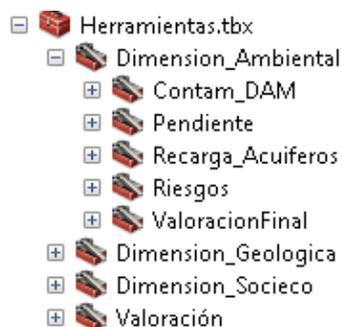


Figura 5.10. Aspecto de la caja de herramientas contenedora de los modelos generados. Elaboración propia.

En los siguientes apartados serán analizadas, a modo de ejemplo, algunas de las herramientas generadas más interesantes, bien por su complejidad o bien por el uso de iteradores.

### 5.3.1. Herramienta para el cálculo del *Impacto potencial en la economía local*

Este geoprocesamiento, compuesto por varios submodelos, tiene como objetivo el cálculo del tamaño medio de los núcleos de población en un área de influencia limitada por un tiempo de 25 minutos en torno al indicio o al yacimiento. Para ejecutar la herramienta será necesario introducir como parámetro de entrada una de las capas correspondientes a los recursos minerales o aguas localizables en Aragón, obteniéndose como salida una actualización de los campos de la tabla de atributos de esa capa con el tamaño medio de los núcleos de población en el área de influencia. Esta misma herramienta agrupará los diferentes puntos que componen la capa en diversas categorías según el impacto en la economía local, en función los umbrales establecidos en este indicador.

El modelo final engloba 12 submodelos diferentes, cada uno encargado de realizar una función diferente. Uno de los más llamativos es el primero de ellos, pues es el encargado de generar las áreas de servicio en torno a los parámetros de entrada. Una herramienta fundamental en este submodelo (Figura 5.11.) es la denominada *Calculate location*, ya que permite convertir los yacimientos inventariados en puntos funcionales para el modelo de red (*Network Dataset*) empleado para los cálculos referentes a los tiempos de recorrido.

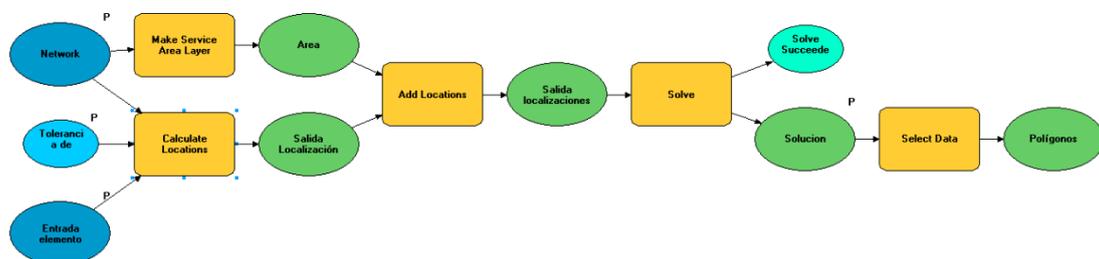


Figura 5.11. Aspecto del primer submodelo del geoprocesamiento. Elaboración propia.

El segundo submodelo, por su parte, itera los polígonos creados en el anterior, correspondientes con el área de influencia generada para cada punto de entrada, recortando los núcleos de población incluidos dentro de dicha área. Posteriormente, mediante la herramienta *Summary Statistics*, se calculará el tamaño medio de estas localidades, dividiendo la población total entre el número de centros habitados, así como el valor absoluto del núcleo más poblado, obteniéndose como salida una tabla con la información estadística de cada una de las áreas de influencia. Los siguientes submodelos contendrán los pasos necesarios para efectuar la unión de todas las tablas creadas en el paso anterior, así como el traspaso de los resultados obtenidos hasta la capa de entrada que contiene las minas, canteras, yacimientos e indicios minerales.

Otro geoprocésamiento será el encargado de categorizar los puntos inventariados en función del resultado obtenido siguiendo los umbrales fijados para la delimitación de los diferentes grupos que componen este indicador. Este mismo submodelo será el encargado de incluir dentro de la categoría más baja aquellos registros de la base de datos localizados dentro del área de influencia de los núcleos de población mayores a 19.000 habitantes. Debido a la forma de valoración diversa de las aguas con respecto del resto de recursos, en este paso se han generado dos submodelos diferentes, uno para este tipo de recursos y otro para el resto de los grupos. El resto de submodelos estarán dedicados a procesos de eliminación de los datos intermedios generados, dejando el SIG listo para la siguiente labor de geoprocésamiento.

Todos los submodelos generados hasta el momento fueron ensamblados en un único geoprocésamiento, de modo que se obtuvo una herramienta que realiza la valoración de este indicador de forma automática. Algunas de las variables empleadas en la herramienta, como la capa contenedora de los puntos correspondientes a mineralizaciones, el modelo de red empleado o los umbrales que delimitarán las categorías, así como otros aspectos del modelo podrán ser modificados con el fin de que la herramienta pueda ser adaptada a las peculiaridades de otros contextos geográficos.

### 5.3.2. Herramienta para el cálculo de las afectaciones a la población

Básicamente, este geoprocesamiento realiza un análisis de visibilidad en un radio de 5 km en torno a los puntos de entrada, coincidentes con ubicaciones potenciales para el desarrollo de labores mineras. A partir de este análisis de visibilidad, el modelo determinará qué núcleos de población quedan expuestos de forma directa a los impactos derivados de este tipo de actividades, al no existir barreras topográficas que los protejan de ruidos, polvo y partículas en suspensión.

Como resultado de este geoprocesamiento se obtendrá una actualización de la tabla asociada a los parámetros de entrada, incluyendo un campo correspondiente a la población total expuesta y otro con la categorización según los intervalos establecidos en función del número de afectados. Este modelo sigue una metodología muy similar al geoprocesamiento utilizado en la valoración del impacto potencial en la economía local. La principal diferencia radica en que este comienza realizando un análisis de visibilidad.

### 5.3.3. Herramienta para el cálculo de la vulnerabilidad por fenómenos naturales extremos

Mucho más sencillas son las herramientas generadas para la automatización de los cálculos referentes a indicadores en los que el territorio ya había sido categorizado previamente, en contraste con la complejidad de aquellos modelos creados para los indicadores en los que la clasificación de los elementos puntuales viene definida por un índice específico.

Por ejemplo, la herramienta que resuelve el indicador referente a la vulnerabilidad frente a eventos naturales extremos, generará un campo en la tabla de entrada para cada proceso natural analizado. En los siguientes submodelos, cada punto registrado en la base de datos recibirá el valor asignado a cada categoría en las que se ha subdividido el territorio en función de la probabilidad de que ocurran los diferentes tipos de eventos catastróficos según su coincidencia espacial con los polígonos que compartimentan el territorio. Finalmente, a partir de estos datos y con el peso asignado a cada tipo de riesgo se calculará un índice, que será el empleado para el establecimiento de las diferentes clases en las que se divide este indicador en función de los umbrales establecidos.

#### 5.3.4. Herramientas finales para la automatización de cálculos

Finalmente, se generaron cuatro herramientas adicionales destinadas a la automatización de los cálculos finales. En concreto, se creó una diferente para cada una de las tres dimensiones establecidas, así como una adicional para el cálculo del potencial global de cada uno de los puntos inventariados. En realidad, debido a los diversos criterios empleados para cada grupo de recursos, existirán variaciones de estas herramientas básicas, de modo que, mientras que para la dimensión *perfil geológico* solo es necesario un modelo de herramienta, para la *inserción socioeconómica* serán empleados dos y para la *aptitud del terreno* tres.

En las herramientas destinadas a la valoración de las diferentes dimensiones, además de la capa de entrada contendora de los datos que serán sometidos a valoración, podrán ser introducidos como variables el peso asignado a cada uno de los indicadores participantes en la valoración, así como los umbrales que marcan la pertenencia a una u otra categoría. Esto permite la exportación de los modelos generados a otros ámbitos espaciales. Por su parte, la herramienta destinada a la determinación del potencial final del yacimiento o indicio mineral realizará los cálculos pertinentes para la adjudicación de cada punto a la categoría de interés correspondiente. Finalmente, analizará la coincidencia o la no coincidencia espacial con algunos de los espacios de la comunidad que por sus características hayan sido clasificados como descartables para la actividad minera.

Además, de cara a la construcción de la aplicación web para la exposición de los resultados se creó un nuevo geoprocesamiento encargado de asignar la simbología correspondiente a cada punto del inventario, según su interés y su estado actual de actividad.

#### 5.4. COMPARTIENDO LOS RESULTADOS

A lo largo de esta tesis se ha incluido numerosa cartografía relacionada con las características del territorio aragonés, con los datos empleados en el análisis efectuado y con algunos de los resultados derivados del mismo. En el Capítulo VI de esta tesis, que

analiza los resultados obtenidos en el análisis propuesto, en el Capítulo III, en el que se estudian los recursos en su contexto geográfico, así como en el Anexo I, los mapas juegan un papel fundamental en la transmisión de la información.

Además de este tipo de mapas, que podrían ser considerados como cartografía básica, fue generada una aplicación web para la visualización de los resultados obtenidos. Esta aplicación fue construida a partir de un *mapa web* albergado en la plataforma online de ArcGIS, mediante una utilidad denominada *Web AppBuilder*.

#### 5.4.1. Cartografía básica

En el contexto de esta tesis, se ha definido como cartografía básica o tradicional a los mapas que representan los datos empleados en las variables o los resultados de los análisis de una forma estática, sin posibilidades de interacción, y cuyo objetivo es el de ser imprimidos o plasmados en la tesis como acompañamiento al texto.

Una vez que la información que se desea representar ha sido recopilada a partir de las diversas fuentes o ha sido obtenida como resultado de los análisis efectuados, la generación de este tipo de cartografía será relativamente sencilla. Bastará con combinar las diferentes capas temáticas que se deseen mostrar con algunas auxiliares que completen el mapa, bien sean de tipo referencial (los límites administrativos a diferentes niveles, las capitales de provincia, la red hidrográfica o la red de transportes, etc.), o con una finalidad ornamental, como el sombreado de relieve incorporado en el fondo de muchos de los mapas creados.

Una vez agregadas todas las capas y establecido el orden de superposición, será imprescindible el establecimiento de una simbología adecuada que ayude a comprender el mensaje del mapa y que sea visualmente estética. Finalmente, serán incluidos los símbolos de mapa (leyenda, escala, etc.) que se consideren necesarios en cada producto cartográfico concreto.

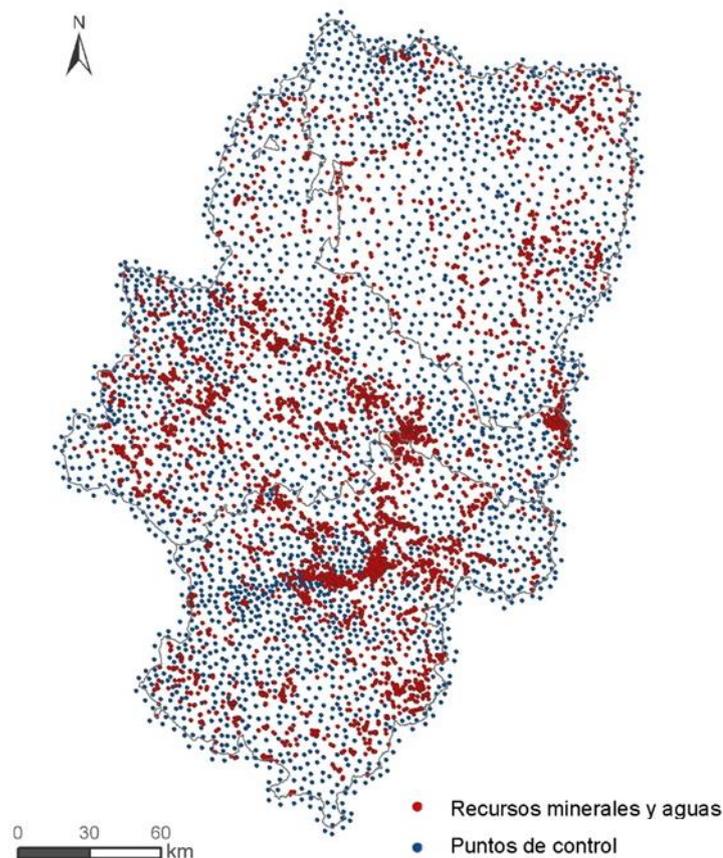
Por otro lado, e igual que parte de la información empleada en el análisis tuvo que ser sometida a tratamientos adicionales antes de poder ser incorporada a las herramientas generadas, tal y como se vio en el tercer apartado de este capítulo de la tesis, algunos de los

datos derivados de dicho análisis necesitaron de un tratamiento auxiliar para poder ser mostrados en la producción de la cartografía básica.

Cabe recordar aquí, que en algunos de los indicadores propuestos en el análisis, y que fueron explicados pormenorizadamente en el cuarto capítulo de la tesis, el elemento estudiado recibía un valor directamente por su ubicación espacial, tras fragmentar el territorio en diversos sectores en función de la combinación cartográfica de una serie de variables. Este es el caso del indicador que valora las afectaciones de los bosques y de la cubierta vegetal, en el que la distribución de las diferentes categorías en función del uso de suelo predominante determinará el mapa final.

Otros indicadores, sin embargo, requerían de la utilización de índices más o menos complejos para su resolución. Estos índices valoran las características de cada punto del territorio, o de su entorno más inmediato, a partir de una serie de variables, siendo exclusivo el valor obtenido para ese punto concreto del terreno. Cinco son los indicadores que se han calculado empleando índices referidos al punto exacto donde se localiza el yacimiento, uno perteneciente a la dimensión *Aptitud del terreno*, concretamente, el referido a las características del relieve y cuatro a la dimensión *Inserción socioeconómica*: Impacto potencial en la economía local, Afectaciones a la población, Afectaciones al paisaje y Propiedad del terreno.

De este modo, una vez que se realizaron los análisis concernientes a cada indicador, se dispuso de información relativa a estos indicadores exclusivamente en unos puntos concretos del territorio, los coincidentes con los yacimientos e indicios minerales inventariados. Para poder analizar el comportamiento del resto del territorio, desprovisto de elementos inventariados, ante el índice planteado, será indispensable someter la información disponible a un análisis geoestadístico. El resultado de este análisis será una capa continua en la que, por interpolación de la información disponible, se habrá calculado el valor probable que tomaría un punto localizado en cualquier ubicación de la región. Estos mapas son incorporados, junto a los derivados de la fragmentación directa del territorio, en el Anexo I.



*Figura 5.12. Distribución de los puntos de control agregados para el análisis geoestadístico. Elaboración propia.*

Como las ubicaciones en las que se han inventariado recursos son limitadas y, además, se concentran mayoritariamente en determinadas áreas de la región, para poder llevar a cabo el análisis geoestadístico de forma más precisa fueron agregados una serie de puntos de control en los espacios localizados entre los puntos inventariados (Figura 5.12.). Se hizo especial hincapié en aquellas zonas en las que existía una mayor variabilidad de los resultados, así como en el área que rodea la comunidad, fuera de los límites de esta. Estos nuevos puntos incorporados fueron sometidos al mismo análisis efectuado para los verdaderos registros de la base de datos, para poder así obtener un resultado para cada uno de los índices que valoran los indicadores anteriormente señalados.

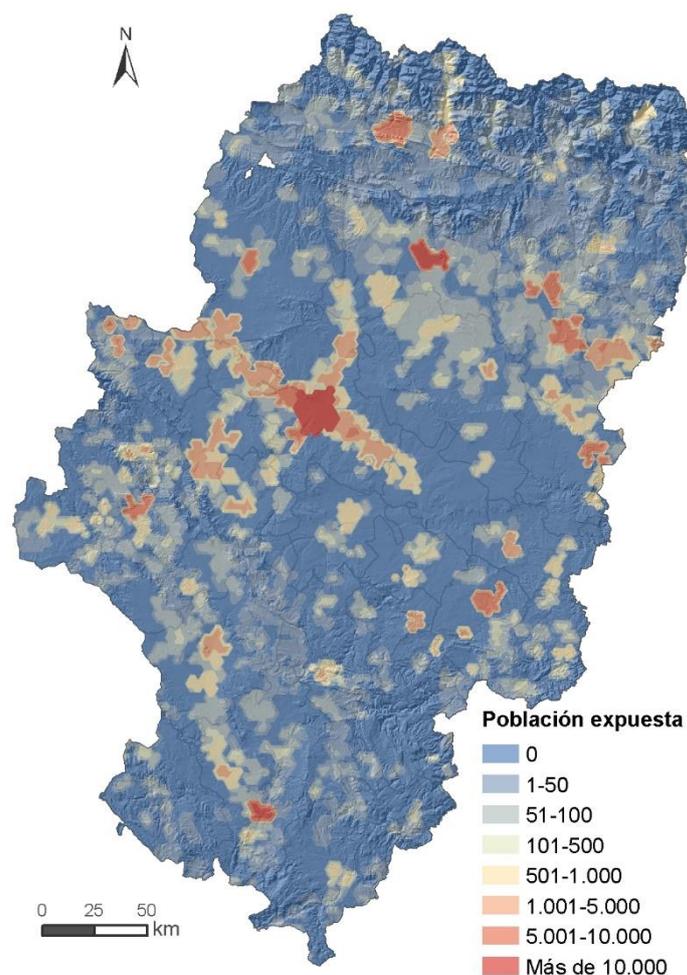


Figura 5.13. Resultado del análisis geoestadístico que determina la población expuesta desde cada punto del territorio. Elaboración propia.

Una vez que se obtuvieron datos sobre los valores de los índices que calculan los cinco indicadores mencionados, pudo procederse a la interpolación de los resultados obtenidos. Como tras la adición de los elementos de control el número de puntos con información asociada es muy elevado, y estos puntos están distribuidos uniformemente por todo el territorio, el método elegido para llevar a cabo la interpolación fue el de la Distancia Inversa Ponderada (*Inverse Distance Weighted*). Este método determina el valor de aquellos puntos del territorio que carecen de información a través de una combinación ponderada linealmente del conjunto de puntos que presentan un valor correspondiente a una magnitud concreta, siendo esta ponderación una función inversa de la distancia. Este método presupone que la variable que se representa disminuye su influencia conforme aumenta la distancia desde la ubicación de muestra (ESRI, 2016a). En la interpolación realizada, se otorgó un peso fuerte a las muestras que poseían un valor asociado, haciendo, además, que

solo se tuvieran en cuenta los puntos cercanos a cada ubicación, para obtener un resultado lo más parecido posible con la realidad.

Como resultado de la interpolación se obtendrá un mapa continuo en el que cada punto del territorio tendrá un valor asociado correspondiente al índice que valora cada uno de los indicadores mencionados, obtenido a partir de los datos disponibles para cada indicador. Por ejemplo, en el indicador que valora el nivel de exposición de núcleos de población, el mapa derivado del análisis geoestadístico (Figura 5.13.) consistirá en una representación del número de habitantes directamente expuesto en cada punto del territorio.

#### 5.4.2. Aplicación web

Uno de los objetivos planteados al comienzo de la tesis consistía en la creación de una plataforma de difusión, visualización y consulta de los resultados derivados de la misma. Finalmente, se determinó que la mejor forma de alcanzar esta meta era mediante una aplicación web que resultara interesante no solo para las empresas relacionadas con el sector minero, sino también para todo el público aragonés, independientemente de cual sea su sector profesional o motivación. Para ello, esta plataforma será dotada de interactividad para permitir al usuario realizar un gran número de consultas mediante pequeñas herramientas sencillas de utilizar.

Para aumentar el atractivo de la aplicación y captar la atención del usuario no experto se han incluido fotografías e imágenes, no solo de las explotaciones mineras, sino también de aquellos elementos que configuran las capas auxiliares, como los núcleos de población, ríos y embalses, las pistas de esquí, las figuras de protección, etc.

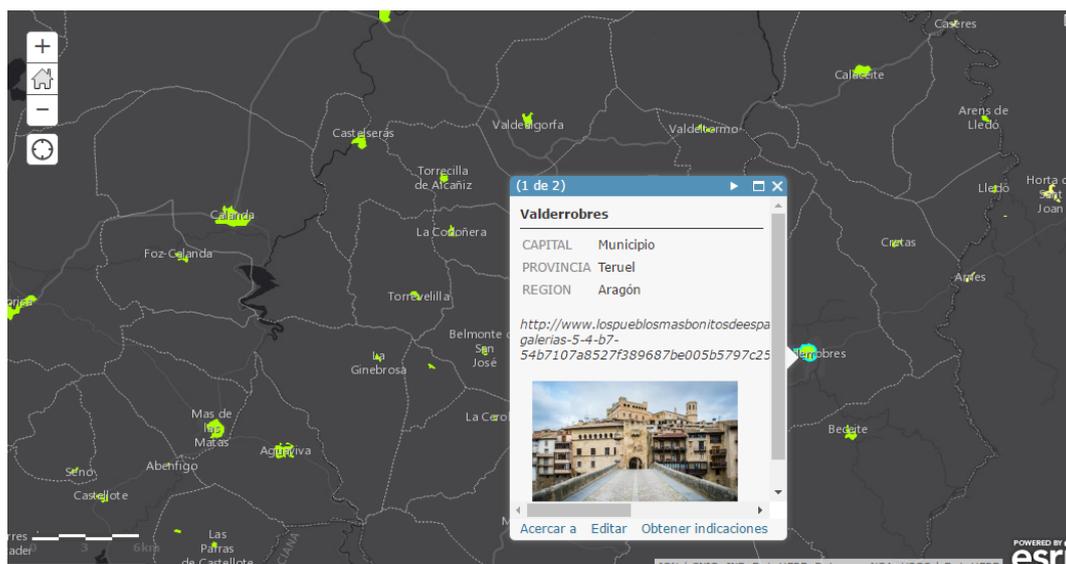


Figura 5.14. Detalle de la ventana emergente de uno de los municipios de la comunidad en el que se muestra la imagen asociada en la ventana emergente. Elaboración propia.

Esta aplicación va un paso más allá de la información mostrada en los geoportales referentes al Catastro Minero, ya que no solo aporta datos sobre los derechos mineros que se encuentran en explotación, otorgados o en trámites en la actualidad, sino que incorpora gran cantidad de información sobre las explotaciones mineras que se explotaron o se estudiaron en el pasado, así como la relativa a los indicios de mineralizaciones presentes en el territorio. Esta información puede ser útil para las empresas mineras a la hora de realizar estudios para la búsqueda de localizaciones en las que puede aparecer un mineral concreto, a los geólogos que quieran conocer las características del territorio, o simplemente para los usuarios que deseen saber un poco más de la región. Además, presenta potencial para convertirse en una herramienta de utilidad para las autoridades en la elaboración de los programas de desarrollo territorial o para los planes de ordenación de los recursos mineros.

No obstante, la minería es una actividad dinámica en la que cada cierto tiempo se inician nuevas labores o, por el contrario, se clausuran algunas explotaciones por agotamiento del recurso o, simplemente, porque dejan de ser rentables. Por otro lado, lo que hoy en día se consideran indicios, a veces acaban desembocando en concesiones de investigación o de explotación, mientras que otros son descartados definitivamente. Tampoco los criterios empleados son algo inmóvil, puesto que puede que los factores que ahora priman cambien el futuro y los datos que han jugado un papel importante en la caracterización de los puntos

inventariados (la población de los núcleos, los espacios protegidos, la ubicación de las infraestructuras proveedoras de servicios etc.) es seguro que variarán en el futuro. Por tanto, la aplicación no puede ser algo estático que muestre únicamente una fotografía de la actualidad, de modo que tendrá que ser sometida a revisión periódica para que siga conservando su vigencia y utilidad.

# Capítulo VI: Diagnóstico de los recursos minerales y energéticos de Aragón en un contexto de sostenibilidad y competencia global

6.1. Criterios para la determinación de los niveles de interés de los recursos considerados

6.2. El potencial minero de Aragón. Resultados para las categorías de recursos consideradas

6.3. El potencial minero de Aragón. Resultados relativos a una selección de recursos

6.4. Recapitulación final

## DIAGNÓSTICO DE LOS RECURSOS MINERALES Y ENERGÉTICOS DE ARAGÓN EN UN CONTEXTO DE SOSTENIBILIDAD Y COMPETENCIA GLOBAL

En este capítulo de la tesis van a ser presentados los resultados del análisis efectuado para evaluar el interés minero, en un contexto de sostenibilidad y competencia global, de los recursos minerales, energéticos y aguas de Aragón que componen la base de datos generada. Dichos resultados derivan de la aplicación de la metodología propuesta en el apartado IV de la tesis.

El contenido de este capítulo completa uno de los objetivos propuestos al inicio de la tesis, concretamente, el correspondiente al análisis y evaluación del potencial de aprovechamiento de los recursos incorporados en la base de datos, teniendo en cuenta el impacto territorial previsible que supondría la puesta en marcha de una actividad minera ligada a ellos.

El análisis de los resultados obtenidos comenzará con la presentación de unos resultados globales según el estado de actividad en el que se encuentran los elementos analizados, primero, y posteriormente, según las categorías de recursos establecidas en este trabajo. Finalmente, se expondrán unos resultados detallados relacionados con el interés minero obtenido por una serie de recursos seleccionados por su especial interés estratégico, económico, ambiental o por su abundancia en el territorio. Este capítulo concluirá con la presentación de los resultados logrados por las formaciones geológicas ricas en materia orgánica susceptibles de ser sometidas a fractura hidráulica para la explotación de hidrocarburos y por los recursos minerales considerados como críticos por la Unión Europea que son localizables, de uno u otro modo, en el territorio aragonés.

La información aportada en este capítulo de la tesis se complementa con dos anexos:

- Anexo I: Cartografía sistemática de los indicadores que componen las dimensiones *Aptitud del terreno* e *Inserción socioeconómica* para una evaluación del interés de explotación de los recursos minerales y energéticos de Aragón.
- Anexo II: Ejemplos de explotación de la herramienta generada para la visualización de los resultados obtenidos.

## 6.1. CRITERIOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS NIVELES DE INTERÉS DE LOS RECURSOS CONSIDERADOS

Antes de la presentación de los resultados obtenidos por el conjunto de recursos analizados, será expuesta una pequeña explicación del método de evaluación diferenciado para cada una de las tres dimensiones consideradas en el análisis. Así, y como consecuencia del análisis de interés minero expuesto en el Capítulo IV de la tesis, cada registro de la base de datos tendrá asociado, para cada una de las tres dimensiones consideradas en este análisis, un valor numérico comprendido en un intervalo entre 1 y 5, en función de los resultados obtenidos por ese punto en cada uno de los indicadores propuestos y de los pesos relativos otorgados a dichos indicadores. La cifra obtenida permitirá el establecimiento de tres categorías diversas: que recibirán las etiquetas de *interés alto*, *interés medio* e *interés bajo*. Como se indicó en el apartado final del capítulo IV de la tesis, el cruce de los resultados obtenidos en cada dimensión permitirá conocer el resultado de interés potencial final.

Si se representa la frecuencia de los resultados numéricos obtenidos en cada dimensión en forma de gráfico, estos adquieren la forma de Campana de Gauss, en torno a valores bien marcados. Como el análisis propuesto sirve para comparar los yacimientos entre sí dentro de un contexto espacial específico, los umbrales numéricos que demarcarán la pertenencia a una u otra categoría no serán valores fijos, sino que se establecerán de un modo en el que en cada categoría exista un número semejante de entidades. Cabe destacar que esta misma forma de actuación fue también la empleada en la evaluación de los indicadores que requieran la agrupación de los elementos estudiados en diversas clases. Estos gráficos ayudarán a establecer los umbrales de pertenencia a una u otra categoría según el criterio mencionado.

En la Figura 6.1. se muestra la frecuencia de los resultados numéricos obtenidos para la dimensión *Perfil geológico* de forma conjunta para los grupos de recursos compuestos por los *minerales metálicos*, *recursos energéticos*, *minerales industriales*, *rocas industriales* y *rocas ornamentales*, puesto que todos ellos fueron evaluados siguiendo los mismos criterios en esta dimensión. Es decir, este gráfico muestra los resultados correspondientes a todos los

grupos de recursos excepto el conformado por las *aguas* y el referente a los *hidrocarburos no convencionales*, cuya evaluación en esta dimensión depende solo de un indicador, por lo que su representación gráfica no se ha juzgado relevante.

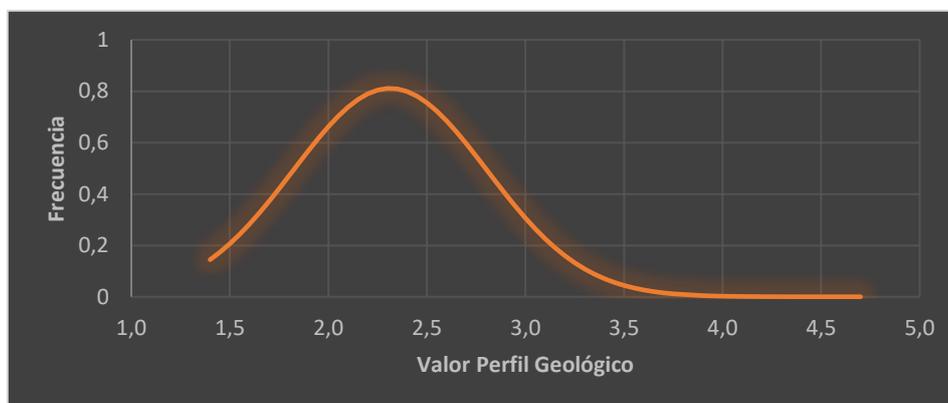


Figura 6.1. Distribución de los resultados obtenidos en la dimensión que valora el perfil geológico. Elaboración propia.

Como puede extraerse del análisis del gráfico, la mayor parte de los resultados obtenidos en esta dimensión se concentran en el intervalo comprendido entre 2,2 y 2,5, aproximadamente. Los elementos del inventario que obtuvieron una puntuación incluida dentro de este intervalo fueron asignados a la categoría de interés *medio*, mientras que si esta cifra fue superior a 2,5, los registros se catalogaron como de interés *alto*. El resto pertenecerá al grupo de interés *bajo*.

En el caso de la dimensión dedicada a la *Aptitud del terreno*, al haber sido empleados criterios de valoración diversos, incluyendo diferentes pesos los indicadores en función de la naturaleza del recurso e, incluso, un indicador más en el caso de las aguas, los resultados obtenidos en esta dimensión para las distintas secciones o grupos de elementos también serán diferentes (Figura 6.2.). Es por esto por lo que a la hora de establecer los umbrales que marcan la pertenencia a las categorías de interés *alto*, *medio* y *bajo* en esta dimensión, las diferencias de distribución en las frecuencias de los resultados obtenidos para las diversas categorías de recursos tendrán que ser tomadas en consideración.

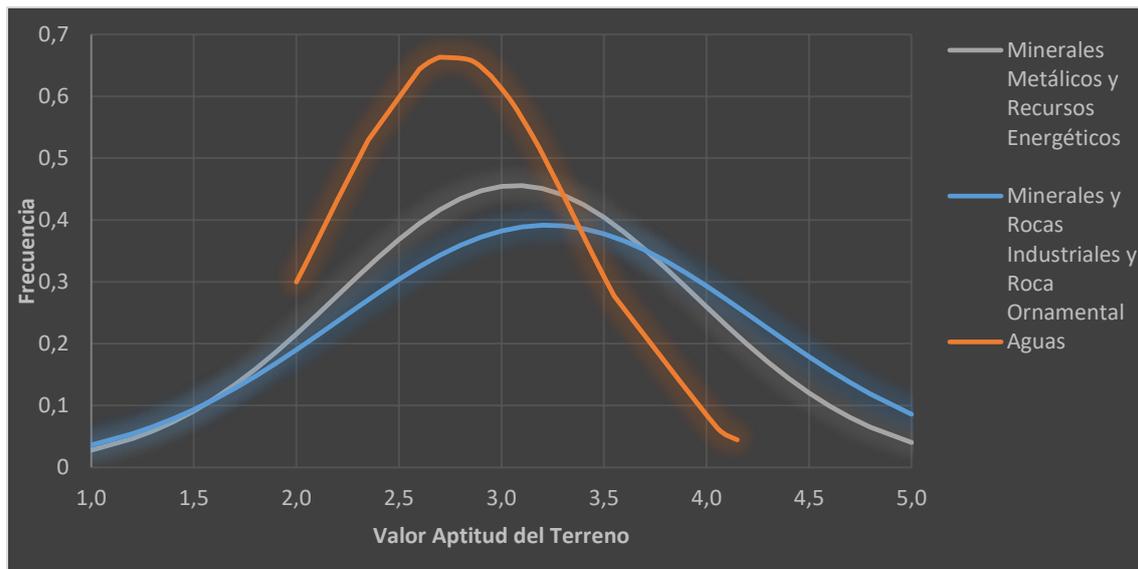
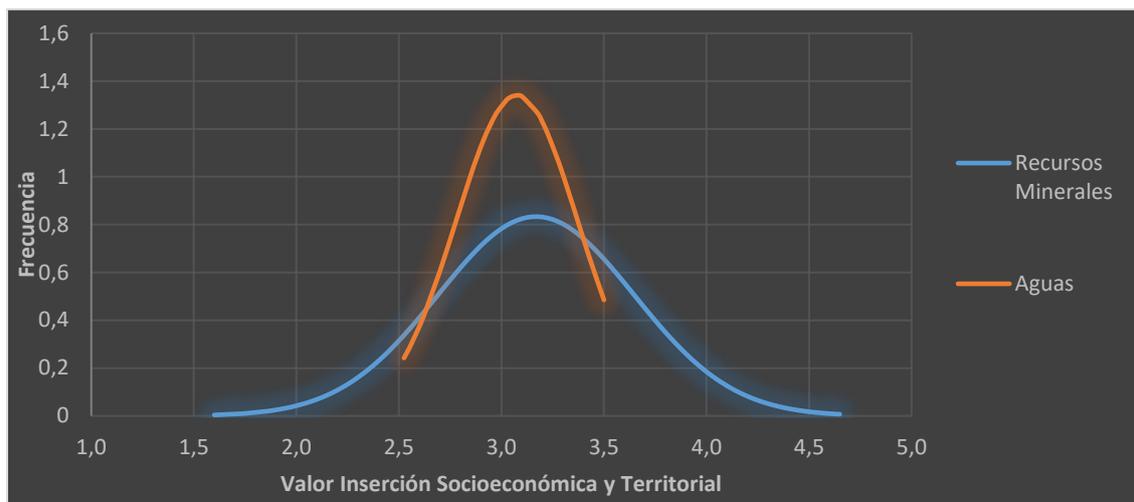


Figura 6.2. Distribución de los resultados obtenidos en la dimensión que valora la aptitud del terreno en función de los grupos de recursos analizados. Elaboración propia.

En los resultados parciales de la dimensión denominada *Inserción socioeconómica*, al haber sido empleados también criterios de valoración diversos para los recursos relacionados con las aguas, los resultados finales obtenidos en esta dimensión por este grupo serán netamente diversos de los logrados por el resto de categorías. En el caso de las aguas, la mayor parte de los elementos inventariados han obtenido resultados concentrados entre 3 y 3,2, y el rango en el que se mueven está limitado al intervalo comprendido entre 2,5 y 3,5. Los resultados obtenidos para el resto de recursos están mucho menos concentrados, como se desprende de la representación de estos datos en el Figura 6.3. Esta distribución forma una Campana de Gauss menos pronunciada que la que representa a las aguas, siendo el intervalo por el que se extiende mucho más amplio. Esta diversidad de resultados justifica el establecimiento de umbrales diferentes en la definición de las categorías de interés empleadas en esta dimensión, distinguiendo entre las que evalúan el grupo de las aguas de las del resto de grupos.



*Figura 6.3. Distribución de los resultados obtenidos en la dimensión Inserción socioeconómica por las aguas y por el resto de recursos minerales analizados. Elaboración propia.*

La categoría de interés resultante del cruce de los valores obtenidos en cada una de las dimensiones no se corresponderá necesariamente con el resultado final. Debido a las perturbaciones generadas por la actividad minera, existirán ubicaciones del territorio en las cuales se desaconsejará activamente o, hasta se prohibirá, toda labor minera, incluso en el caso de que el elemento a explotar sea de importancia económica elevada o de alto valor estratégico. Los elementos de la geobase de datos que se sitúen dentro de alguna de estas áreas consideradas como descartables (Figura 6.4.) pasarán directamente a formar parte de la categoría homónima en el análisis de interés, independientemente de los resultados obtenidos en las tres dimensiones empleadas en la valoración.

Las restricciones en estas áreas pueden estar motivadas por aspectos medioambientales, como es el caso de los Parques Nacionales, en los que la legislación vigente veta totalmente el desarrollo de la actividad minera, así como de otras muchas actividades económicas. Por otro lado, también serán consideradas como descartables aquellas ubicaciones en las que se estén desarrollando actividades económicas más rentables, o que cuya inversión previa justifique su mantenimiento. Dentro de estas categorías se han incluido los aeropuertos y aeródromos de la región, las pistas de esquí del Pirineo y la Cordillera Ibérica y La Ciudad del Motor de Aragón (Motorland) en Alcañiz, ya que ocupan una superficie considerable, si bien, podrían ser incorporadas otras de tamaño más reducido.

Finalmente, en el contexto de esta tesis, se incluyeron dentro de las áreas vetadas para la actividad minera todas las superficies urbanizadas correspondientes a los diversos núcleos de población aragoneses. Aunque pueda parecer algo obvio, hay que tener en cuenta que parte de la información empleada en la generación de la base de datos procede de fuentes elaboradas hace ya varias décadas. Así, esta información puede hacer referencia a explotaciones o canteras abandonas, yacimientos e indicios minerales localizados en los alrededores de localidades que hayan crecido lo suficiente durante este periodo de tiempo como para cubrir dichas mineralizaciones en la actualidad.

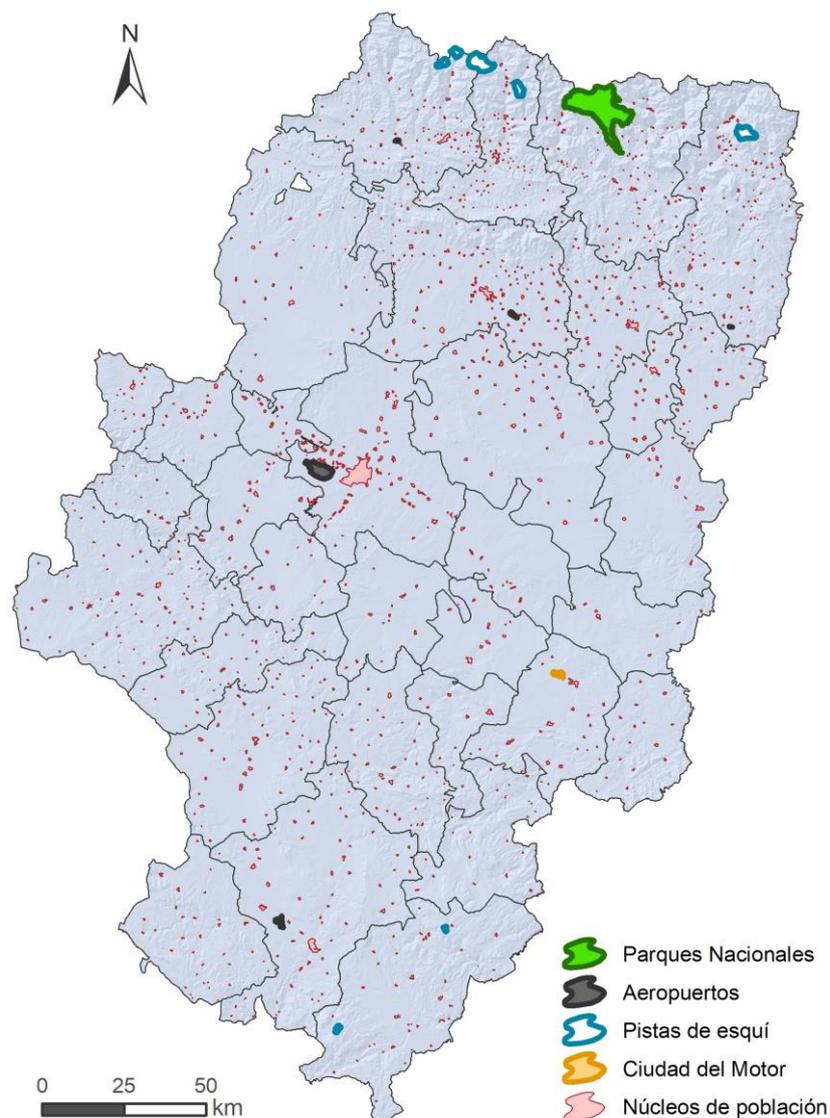


Figura 6.4. Ubicaciones consideradas como descartables para el establecimiento de una labor extractiva por sus características medioambientales o por el uso del suelo actual. Elaboración propia.

## 6.2. EL POTENCIAL MINERO DE ARAGÓN. RESULTADOS PARA LAS CATEGORÍAS DE RECURSOS CONSIDERADAS

En este apartado se presentarán sistemáticamente los resultados globales obtenidos por los registros constituyentes de la base de datos agrupados, en primer lugar, en función de su estado de actividad y, consecutivamente, según las categorías de recursos establecidas en el Capítulo III de la tesis. Finalmente, se realizará una evaluación global del interés minero de todos los recursos analizados, sintetizando los resultados a nivel regional y provincial.

### 6.2.1. Resultados por estado de actividad

Antes de analizar los resultados obtenidos por los puntos inventariados en el análisis de interés minero según el estado de actividad en el que se encuentran en la actualidad, conviene examinar el número de elementos que fueron asignados a cada una de las categorías que componen este indicador (Figura 6.5.). Cabe destacar que los puntos que componen el inventario fueron divididos en cinco grupos en función de su estado de actividad y que estas categorías recibieron el nombre de: *En explotación, Con derechos otorgados o en tramitación, Potencialmente recuperables, Indicios minerales y Descartados*, tal y como fue expuesto en los capítulos III y IV. Los puntos descartados, es decir, aquellos en los que una antigua concesión de exploración no derivó directamente en una labor minera efectiva, estarán englobados en la categoría homónima, independientemente de los resultados obtenidos en las tres dimensiones que componen el análisis.

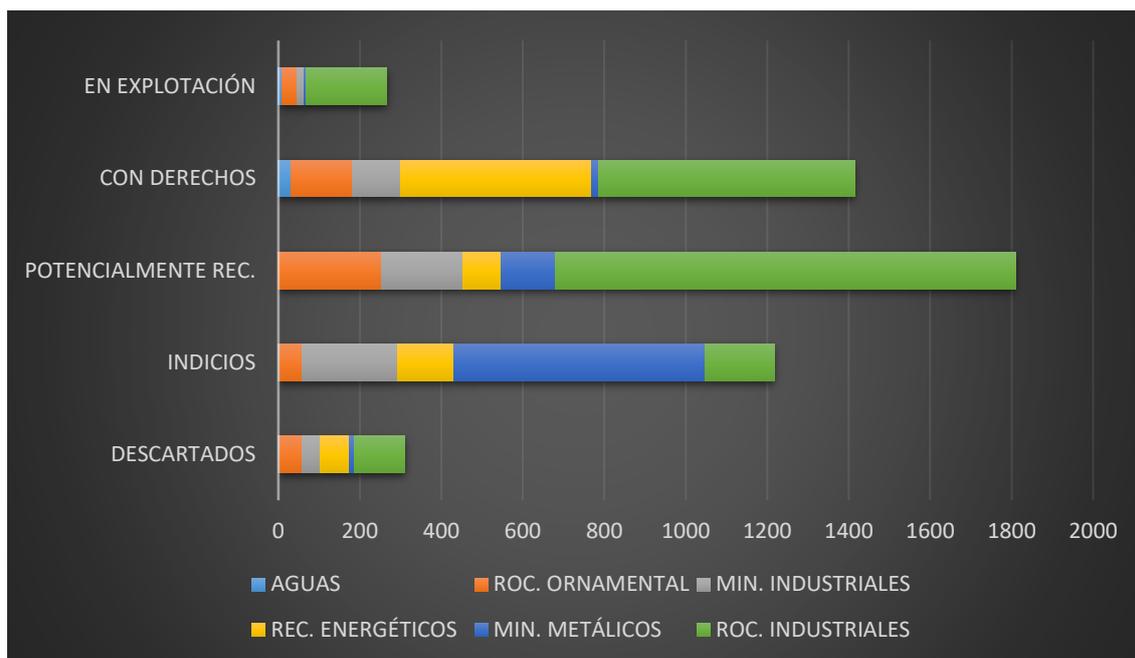


Figura 6.5. Número de registros en la base de datos por estado de actividad y por grupo de recursos. Elaboración propia.

En el momento de la elaboración de la base de datos se encontraban en actividad 266 labores mineras, lo que hace de este estado el menos numeroso en términos de puntos asignados. La inmensa mayoría de las labores mineras en explotación están relacionadas con el aprovechamiento de roca industrial (un 75% del total). Existen, además, 38 labores relativas al laboreo de roca ornamental, 15 de minerales industriales, 9 ligadas a la explotación de los diferentes tipos de agua, 5 con la minería metálica y solo 1 destinada a la extracción de recursos energéticos.

La mayor parte de los registros inventariados (más de 1.800) pertenecen a la categoría de los potencialmente recuperables, es decir, a aquellos yacimientos que estuvieron en explotación en tiempos remotos pero que en la actualidad no hay asociada ninguna actividad extractiva. Son las rocas industriales las que aportan un mayor número de entidades a este estado de actividad, condicionando, además, su predominio numérico sobre el resto de categorías. Este tipo de recursos también aporta un buen número de registros al estado de actividad denominado *Con derechos otorgados o en tramitación*, que incluye aquellos yacimientos sobre los que existe una concesión en el Catastro Minero y que, podría derivar en una explotación en un futuro, a corto o medio plazo. Es este estado de actividad, con 1.413 elementos inventariados, es el segundo en número a nivel regional.

Los indicios minerales son el tercer grupo por número de elementos adscritos, con algo más de 1.200 puntos incorporados. En esta categoría destacan los indicios referentes a minerales metálicos, seguidos por los de minerales industriales. Por su parte, los elementos descartados son el segundo grupo menos numeroso, con 311 elementos incorporados. Otra vez, las rocas industriales aportan el mayor número de elementos a este estado de actividad, seguidas de lejos por los recursos energéticos y las rocas ornamentales.

El estudio del estado de actividad predominante en cada grupo de recursos (Figura 6.6) puede dar una idea del momento económico en el que se encuentra la región y de las características de los recursos que en ella se localizan. Quizás el dato más interesante sea el predominio de canteras abandonadas en grupos como las rocas industriales, las rocas ornamentales o, en menor medida, los minerales industriales. El cese de la actividad en estas categorías podría estar ligado a una etapa de desaceleración en la construcción, posiblemente asociada a una crisis económica. Sin embargo, que el número de derechos de exploración y explotación otorgados sea también relativamente elevado indicaría una recuperación económica y un crecimiento del sector ligado al ladrillo.

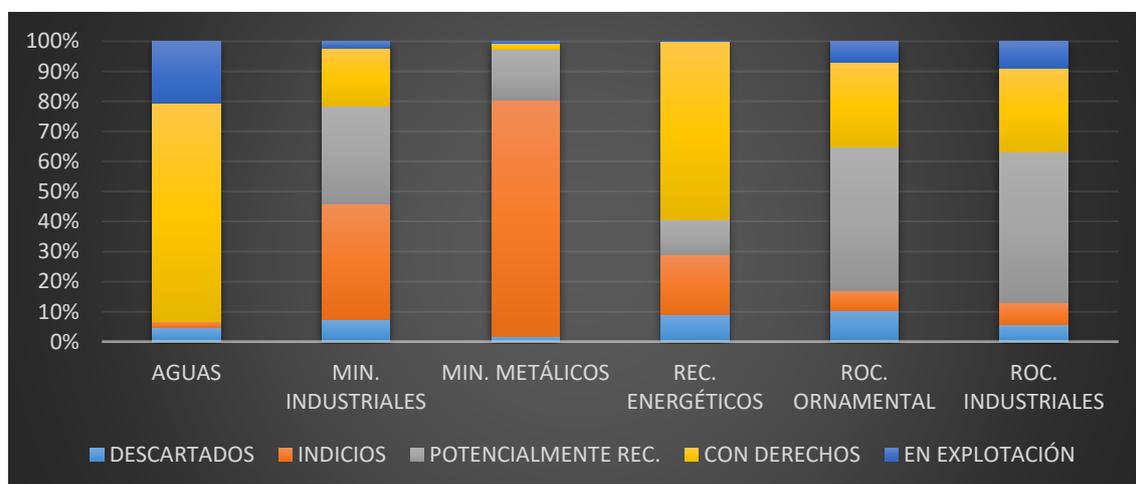


Figura 6.6. Porcentaje de elementos perteneciente a cada estado de actividad en cada grupo de recursos. Elaboración propia.

El porcentaje de derechos otorgados para la explotación de aguas es mucho más elevado que el de aprovechamientos ya activos, indicador de un posible auge en el interés por la utilización de este tipo de recursos. Por otro lado, la mayoría de las mineralizaciones metálicas se corresponden con indicios, es decir, aunque se supone la existencia de ese

recurso en el territorio, no se han llevado a cabo análisis posteriores que estudien la posibilidad de la puesta en marcha de una labor extractiva ligada a ellos. En este grupo de recursos, las explotaciones abandonadas son también relativamente numerosas. Esto puede indicar una pérdida de interés en el aprovechamiento de estos recursos por diversas razones, entre las que se puede incluir la posibilidad de obtención del mineral metálico en mercados internacionales. La creciente competencia global, analizada en el segundo capítulo de la tesis, podría provocar que los recursos autóctonos vuelvan a ser el centro de atención de las autoridades y empresas competentes.

Por otro lado, los resultados obtenidos en el análisis efectuado (Figura 6.7.) muestran una clara diversidad del interés minero según el estado de actividad del punto inventariado, tal y como podría ser previsto. El porcentaje de elementos clasificados dentro del grupo de interés alto crece notablemente al ascender hacia los estados de actividad más valorados, así como decrece el porcentaje de elementos de interés bajo.

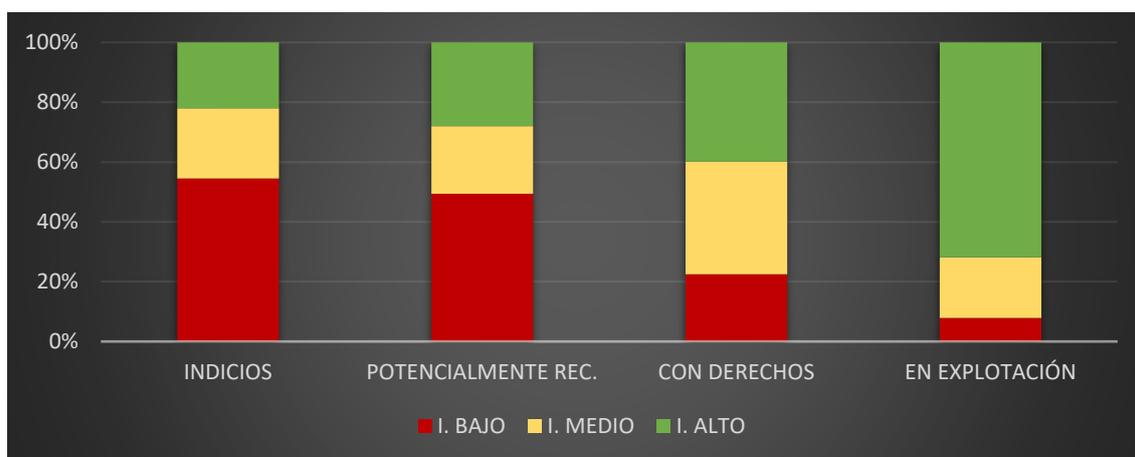


Figura 6.7. Porcentaje de elementos incorporado a cada categoría de interés en cada estado de actividad. Elaboración propia.

El porcentaje de elementos clasificados dentro de la categoría de interés alto en los estados denominados *Indicios* y *Potencialmente recuperables* es de solo del 22% y 28%, respectivamente. Valor que aumenta hasta el 40% en los puntos que tienen derecho mineros otorgados y hasta el 72% en los elementos en explotación. Por otra parte, 17 de las labores activas en el momento de la generación de la base de datos presentaban resultados de interés negativos, calificación derivada, en la mayoría de los casos, de una baja aptitud del territorio y una inserción socioeconómica deficiente. Además, más de un 20% de los

puntos con derechos otorgados fueron también asignados a esta categoría mínima. El porcentaje de elementos pertenecientes a la categoría de interés más bajo crece en los otros dos estados de actividad alcanzando el 49% entre las labores abandonadas y el 55% en los indicios minerales.

Prácticamente, todos los puntos correspondientes a recursos que se encontraban en explotación cuando se creó la base de datos han sido asignados a las categorías de interés medio o alto (Figura 6.8.). La clase de interés alto es la más frecuente en todos los grupos, con la excepción de los recursos energéticos, en la que el 100% de los elementos recibieron la catalogación de interés medio. Por el contrario, en el caso de las aguas, todos los elementos inventariados pertenecían a la categoría de interés más alta. En el resto de grupos, este porcentaje varía entre el 60% correspondiente al de los minerales metálicos y casi el 90% de los minerales industriales. Por otro lado, en torno al 10% de los elementos correspondientes a los grupos de las rocas ornamentales e industriales han sido clasificados dentro de la clase de interés bajo.

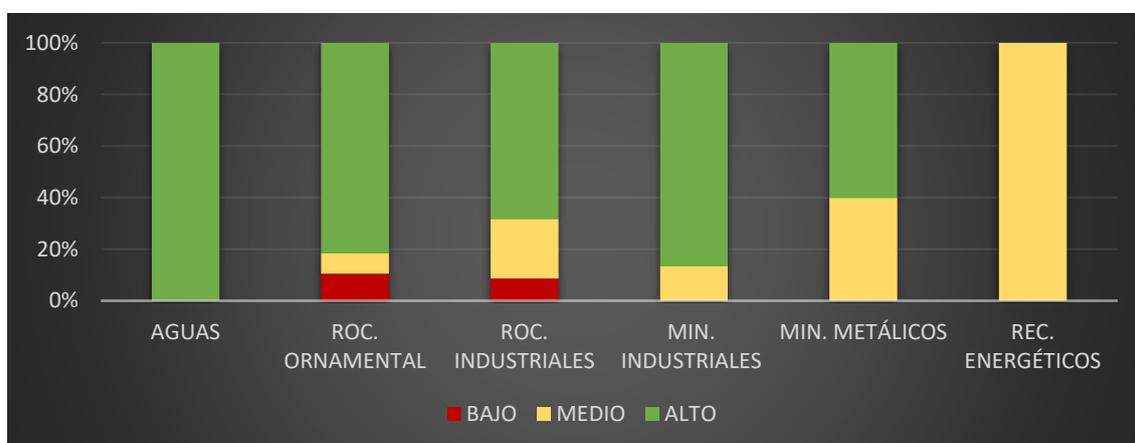


Figura 6.8. Porcentaje de explotaciones activas incorporadas a cada categoría de interés para los diferentes grupos de recursos. Elaboración propia.

En el caso de los puntos inventariados con derechos otorgados o en tramitación (Figura 6.9.), un porcentaje muy elevado de los elementos analizados han obtenido una valoración positiva. Esta catalogación, que supera el 30% en todos los grupos en los que se han dividido los recursos, sobrepasa el 40% en las aguas y los minerales industriales y el 80% en el grupo de los minerales metálicos. En todos los grupos de recursos analizados, en este estado de

actividad, los elementos calificados dentro de la categoría de interés bajo son los menos frecuentes.

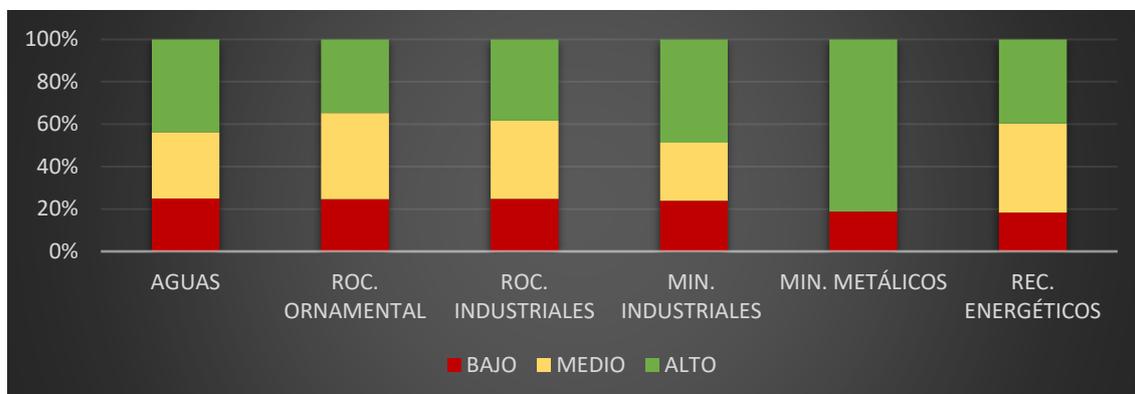


Figura 6.9. Porcentaje de derechos mineros clasificados en cada categoría de interés para los diferentes grupos de recursos. Elaboración propia.

En los resultados obtenidos por las antiguas explotaciones (Figura 6.10.) dominan los elementos calificados dentro del interés más bajo en todas las categorías de recursos excepto entre las rocas ornamentales, donde aproximadamente la mitad de los registros muestran resultados positivos. El porcentaje de registros catalogados como de interés alto es más escaso en el resto de los grupos y, casi anecdótico en el caso de los recursos energéticos, donde solo 2 de los 94 puntos registrados obtuvieron esta calificación. Por su parte, la categoría de interés más bajo es la dominante en todos los grupos excepto en el constituido por las rocas ornamentales. Los recursos energéticos muestran un porcentaje excepcionalmente elevado de registros de interés bajo al recibir, muchos de ellos, una calificación baja en las tres dimensiones analizadas, especialmente en el denominado *Perfil geológico*.

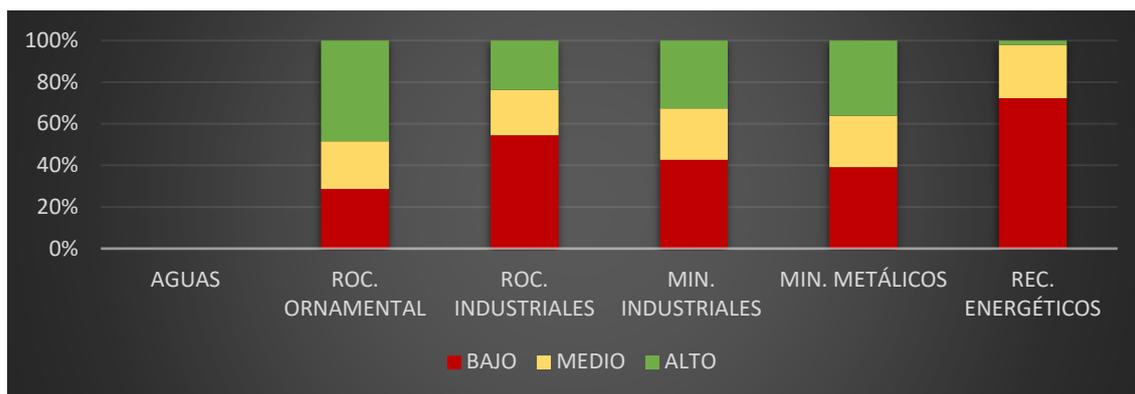


Figura 6.10. Porcentaje de yacimientos potencialmente recuperables clasificados en cada categoría de interés para los diferentes grupos de recursos. Elaboración propia.

Los indicios muestran unos resultados muy similares a los obtenidos por las antiguas explotaciones mineras, tanto a nivel global como por grupo de recursos (Figura 6.11). La diferencia más notable es el aumento en el porcentaje de recursos englobados dentro de la categoría de interés más alto entre los recursos energéticos y las rocas ornamentales. En general, dominan los elementos de interés más bajo, excepto entre las aguas, donde todos los elementos registrados han sido incluidos dentro del grupo de interés medio, y las rocas ornamentales, grupo en dominan los de interés alto. El grupo de los recursos energéticos es el que presenta un porcentaje más elevado de indicios clasificados como de interés bajo, seguido por las categorías formadas por las rocas y los minerales industriales.

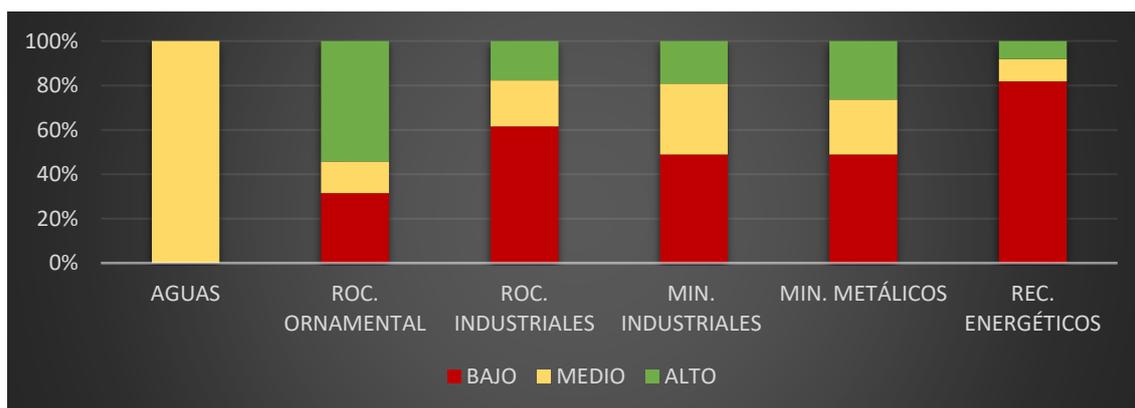


Figura 6.11. Porcentaje de indicios clasificados en cada categoría de interés para los diferentes grupos de recursos. Elaboración propia.

### 6.2.2. Resultado por grupos de recursos

Analizando los resultados obtenidos en el análisis del interés minero por los puntos que componen cada grupo de recursos pueden observarse diferencias notables. Más de la mitad de los relacionados con los diversos tipos de aguas explotables en la comunidad han sido asignados a la categoría de interés alto, un dato muy superior al del resto de las clases en las que se han dividido los recursos mineros. Además, las aguas conforman el único grupo, junto con el que engloba las rocas ornamentales (42% de interés alto frente a 23% de interés bajo), en el que el porcentaje de elementos catalogados como de interés alto supera al del interés más bajo (Figura 6.12.).

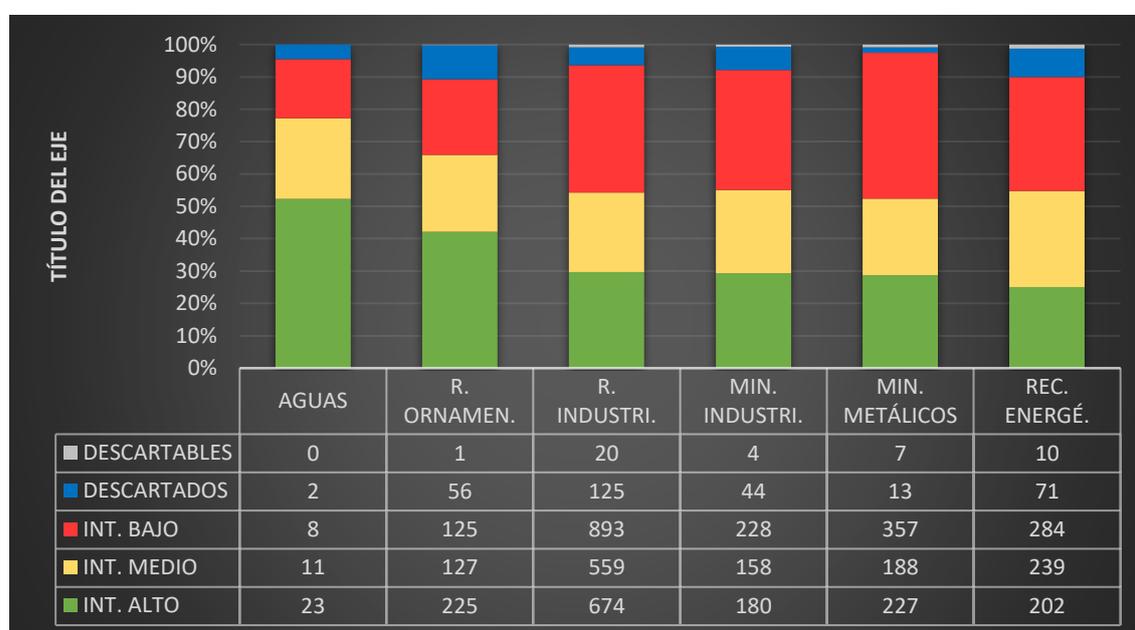


Figura 6.12. Resultados del análisis por grupo de recursos. Elaboración propia.

El porcentaje de puntos inventariados clasificados en la categoría de interés alto para el resto de grupos en los que se han dividido los recursos mineros muestran valores semejantes, con cifras que varían entre el 25% de los recursos energéticos y el 30% de las rocas industriales. Por otro lado, el porcentaje de elementos de interés medio no es predominante en ninguno de los grupos de recursos analizados.

Entrando en el análisis detallado de cada uno de los grupos en los que se han dividido los recursos mineros y aguas de la región, y tal y como se ha apenas manifestado, más del 50% de los puntos correspondientes a explotaciones relacionadas con las aguas han recibido la

catalogación de interés alto en el análisis que determina el interés de los recursos (Figura 6.12.). El resto de los registros han sido clasificados como de interés medio (25%), interés bajo (18%) y descartados (5%).

Los buenos resultados globales obtenidos por los registros referentes a este tipo de recursos se derivan, principalmente de la buena valoración lograda en dos de las dimensiones consideradas (Figura 6.13.). No en vano, más del 43% de los puntos fue catalogado de interés alto en la dimensión que estudia la *aptitud del terreno* y casi el 50% en la denominada como *Inserción socioeconómica*. Por el contrario, más del 70% de los registros fue incorporado a la categoría de interés medio según sus resultados para la dimensión *Perfil geológico*.

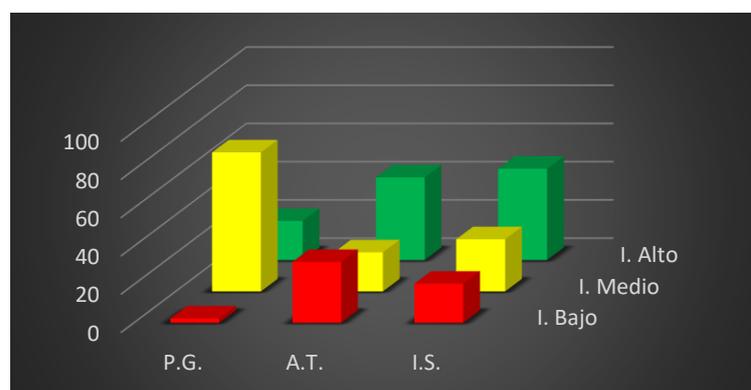


Figura 6.13. Resultados del análisis del potencial minero en cada una de las dimensiones consideradas para los registros relativos a las aguas. Elaboración propia.

Sin embargo, si atendemos de forma individual a la distribución de los registros de la base de datos según las 27 combinaciones posibles resultantes del cruce de las tres dimensiones estudiadas (Figura 6.14.), la opción más repetida entre las aguas combinaba un *Perfil geológico* de interés medio, una *Aptitud del terreno* de interés bajo y una *Inserción socioeconómica* de interés alto. Otras situaciones relativamente frecuentes son las que combinan resultados de interés positivos para la *inserción socioeconómica* y de interés medio para el *perfil geológico*, con un interés medio o alto en la tercera de las dimensiones del análisis.

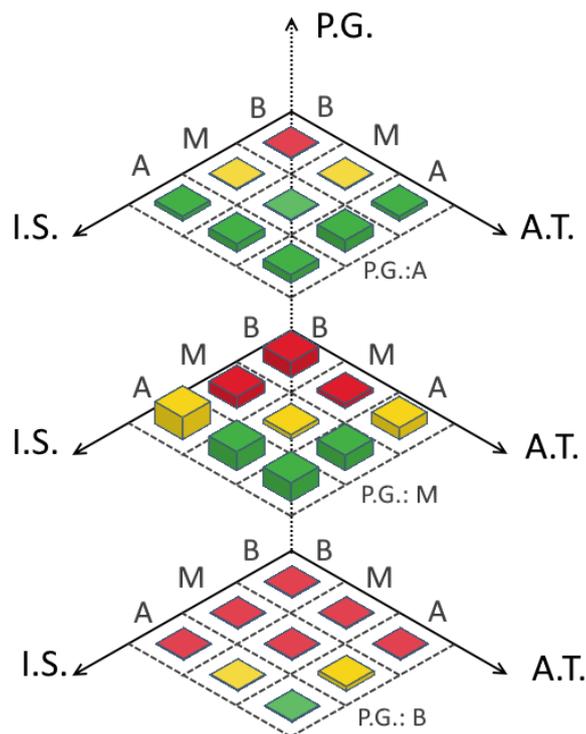


Figura 6.14. Proporción de registros incorporados en cada una de las posibles combinaciones derivadas del cruce de las tres dimensiones consideradas en el análisis para el grupo de las aguas. Elaboración propia.

En cuanto a la distribución espacial de los resultados del análisis, parece observarse una clara concentración de los registros que han logrado una calificación positiva en el entorno de la provincia de Huesca (Figura 6.15.). En términos absolutos, esta provincia es la que cuenta con un mayor número de explotaciones pertenecientes al grupo de interés alto (11), seguida por Zaragoza (8) y Teruel, con cuatro. Además, el menor número de elementos de interés bajo (1) también se da en la provincia oscense.

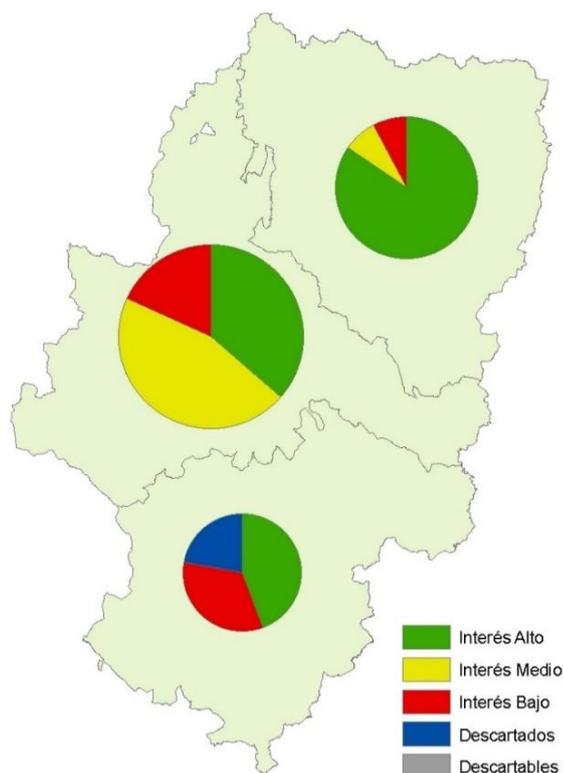


Figura 6.15. Porcentaje de elementos clasificados por interés y provincia para el grupo de las aguas. El tamaño de los círculos es proporcional al número de elementos inventariados. Elaboración propia.

Los resultados del análisis de interés obtenidos para los elementos inventariados dentro del grupo correspondiente a las rocas ornamentales indican un predominio claro de la categoría de interés alto (42,1%). Las otras dos categorías de interés, medio y bajo, aglutinan, respectivamente, un 23,7 y 23,4% de los yacimientos de rocas ornamentales. Estos buenos resultados derivan, esencialmente, de una adecuada *inserción socioeconómica* y de una propicia *aptitud del terreno* (Figura 6.16.). No en vano, en torno a un 40% de los registros de la base de datos correspondientes a rocas ornamentales han recibido una calificación de interés alto en, al menos, una de las dimensiones. Por el contrario, de los más de 500 registros de rocas ornamentales, el 50% obtuvo una valoración negativa en la dimensión que estudia el *perfil geológico*.

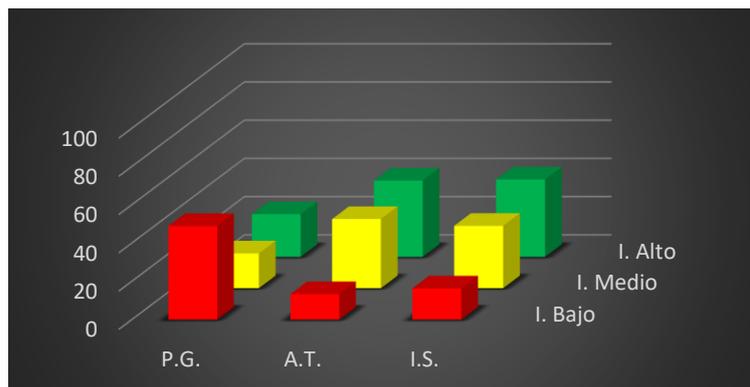


Figura 6.16. Resultados del análisis del potencial minero en cada una de las dimensiones consideradas para los registros relativos a las rocas ornamentales. Elaboración propia.

De este modo, no es extraño observar que, con un 22% del total y con mucha diferencia sobre el resto, la casilla de la matriz de cruce de las tres dimensiones consideradas en el análisis más representada sea la que combina un interés del *perfil geológico bajo* con una valoración positiva en las otras dos dimensiones (Figura 6.17.).

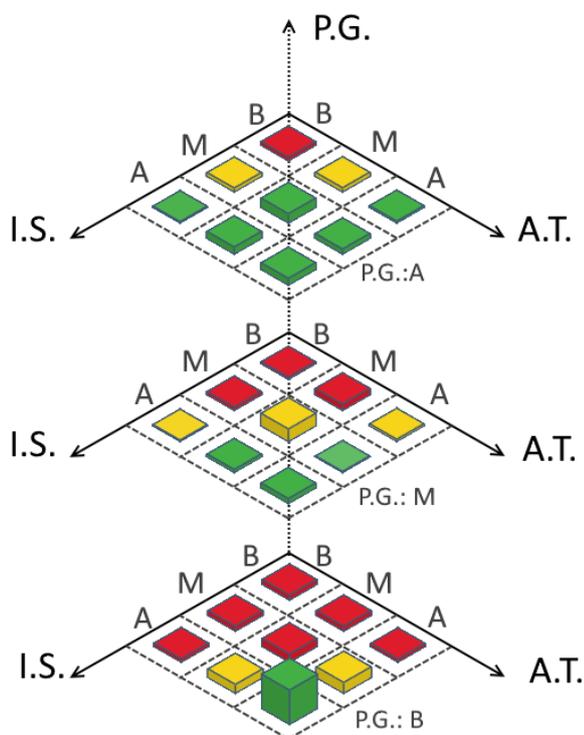


Figura 6.17. Proporción de registros incorporados en cada una de las posibles combinaciones derivadas del cruce de las tres dimensiones consideradas en el análisis para el grupo de las rocas ornamentales. Elaboración propia.

La distribución geográfica de los resultados muestra que, a nivel provincial (Figura 6.18.), Zaragoza acoge la mayor parte de los yacimientos de rocas ornamentales cuyo interés minero ha sido determinado como alto, 129, lo que representa el 57% del total provincial. Le sigue la provincia de Teruel con 89. En términos absolutos, Teruel cuenta con el mayor número de elementos clasificados como de interés bajo, sin embargo, es en la provincia de Huesca donde el porcentaje es más elevado (59%).

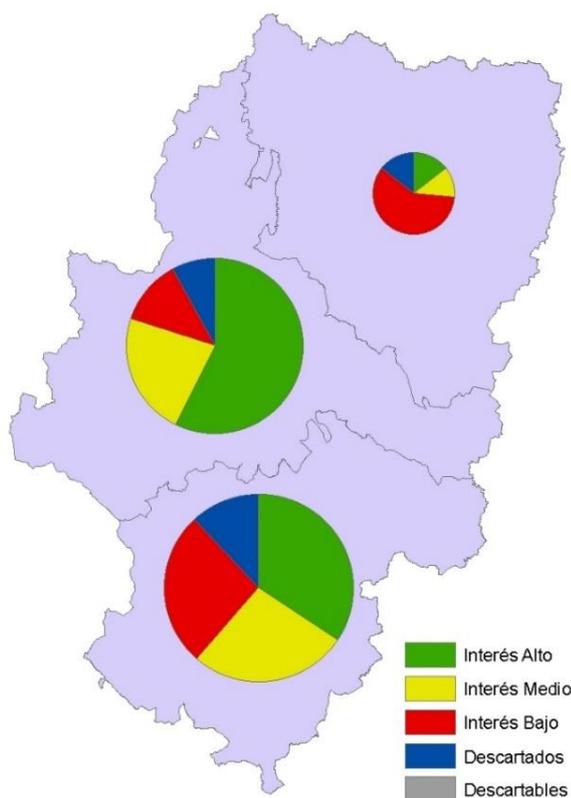


Figura 6.18. Porcentaje de elementos clasificados por interés y provincia para el grupo de las rocas ornamentales. El tamaño de los círculos es proporcional al número de elementos inventariados. Elaboración propia.

Tras las categorías conformadas por las aguas y las rocas ornamentales, las rocas industriales son las que presentan un porcentaje mayor de elementos catalogados como de interés alto (29,7%). Por otra parte, un 24,6% de los registros correspondientes a ese grupo de recursos fue asignado a la categoría de interés medio, mientras que los de interés bajo representan casi un 40% del total. Los elementos catalogados dentro del grupo de interés alto dominan en dos de las dimensiones analizadas, el *Perfil geológico* y la *Inserción socioeconómica* (Figura 6.19.). En la tercera de las dimensiones consideradas en el análisis los elementos de interés medio son los predominantes.

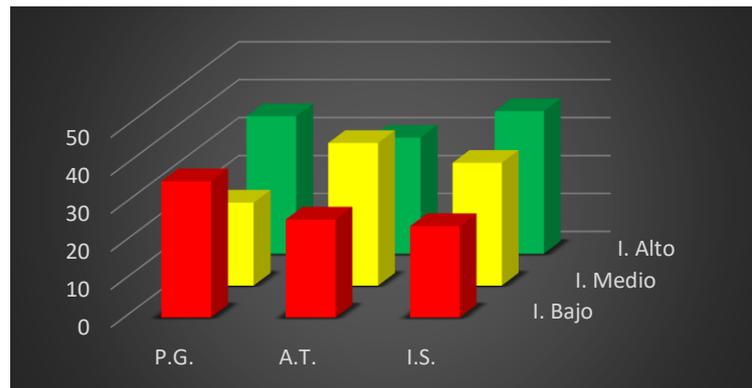


Figura 6.19. Resultados del análisis del potencial minero en cada una de las dimensiones consideradas para los registros relativos a las rocas industriales. Elaboración propia.

En la matriz de cruce no existe ninguna combinación que destaque sobre el resto, si bien las más numerosas son las que incorporan los elementos calificados con un interés bajo en las dimensiones *Perfil geológico* y *Aptitud del terreno* con un resultado variable en la otra dimensión, todas ellas incluidas en la catalogación final de potencialidad minera correspondiente al interés bajo. Dentro de la catalogación relativa a una potencialidad minera alta, la mayoría de los registros incorporados lo hacen por la combinación de una adecuada *inserción socioeconómica* y una valoración positiva en la dimensión *Perfil Geológico*.

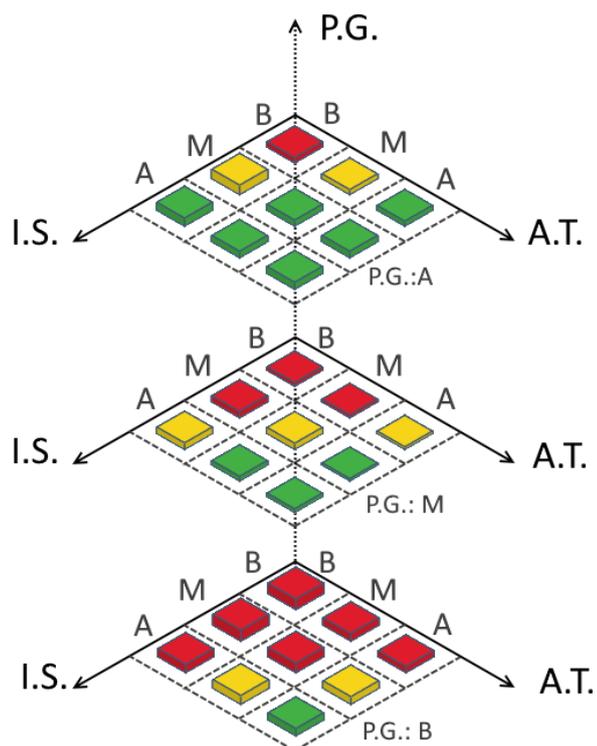


Figura 6.20. Proporción de registros incorporados en cada una de las posibles combinaciones derivadas del cruce de las tres dimensiones consideradas en el análisis para el grupo de las rocas industriales. Elaboración propia.

Los porcentajes de elementos clasificados dentro de la categoría de interés alto son asimilables en las tres provincias aragonesas (Figura 6.21.), en torno al 30% en Teruel y Zaragoza, y algo inferior (25%) en la de Huesca, si bien, en términos absolutos el número de registros es superior al doble (más de 250 puntos registrados) en las provincias de Zaragoza y Teruel que en la de Huesca (118). Es en esta provincia donde el porcentaje de elementos catalogados dentro del grupo de interés bajo alcanza un valor mayor (50,3%).

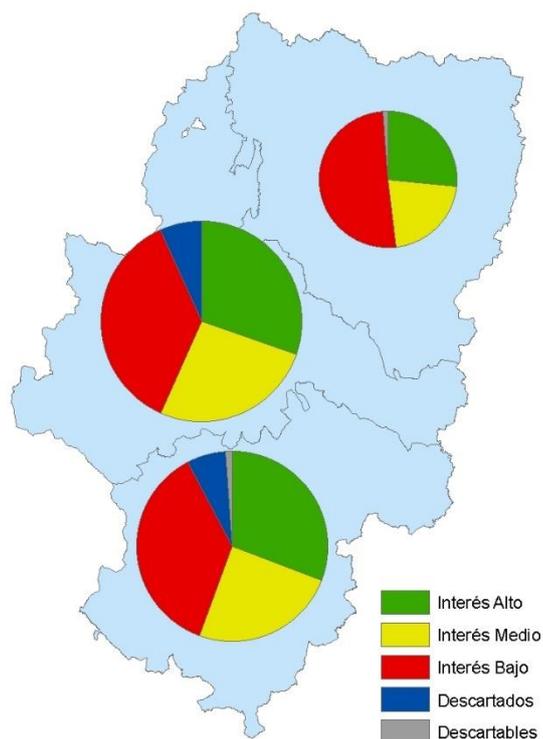


Figura 6.21. Porcentaje de elementos clasificados por interés y provincia para el grupo de las rocas industriales. El tamaño de los círculos es proporcional al número de elementos inventariados. Elaboración propia.

Los resultados obtenidos en el análisis por el conjunto de los recursos que conforman el grupo de los minerales industriales arrojan los siguientes datos: un 29% de los puntos analizados pertenecen a la categoría de interés más alto, un 25% a la de interés medio y un 37% se encuentran concentrados en la categoría de interés bajo. Además, un 7% fueron descartados y un 0,7% se localiza dentro de ubicaciones descartables.

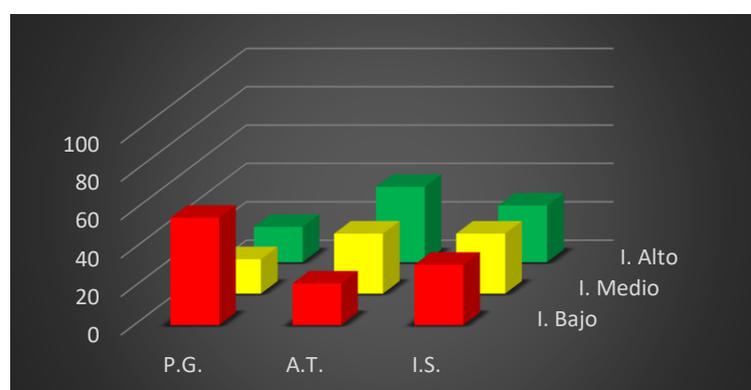


Figura 6.22. Resultados del análisis del potencial minero en cada una de las dimensiones consideradas para los registros relativos a los minerales industriales. Elaboración propia.

Estos pobres resultados globales se derivan, principalmente, de una mala calificación en la dimensión *Perfil geológico*, donde un 56% de los registros obtuvieron la catalogación de interés bajo y solo un 18,5% la de interés alto (Figura 6.22.). En la dimensión *Inserción socioeconómica* estos datos no son tan negativos, si bien siguen dominando los registros que obtuvieron una valoración baja en esta dimensión (31,6%) frente a los estimados positivamente (29,7%). Por su parte, la dimensión del análisis conocida como *Aptitud del terreno* presenta unos resultados netamente más positivos, dominando los elementos calificados como de interés alto, con casi el 40%, y los de interés medio (31,5%).

Tras lo expuesto hasta el momento para este grupo de recursos, parece evidente que las combinaciones predominantes en el cruce de los resultados obtenidos para las tres dimensiones consideradas serán las que incluyan un interés bajo en el *perfil geológico*, una catalogación positiva en la dimensión *Aptitud del terreno* y valores medio o altos en la dimensión *Inserción socioeconómica* (Figura 6.23.). Son precisamente estas dos combinaciones las más frecuentes entre los registros correspondientes a los minerales industriales (con un 10,7% para los de interés alto en la dimensión *Aptitud del terreno* y 9% para los de interés medio). Otra combinación relativamente frecuente (8,9%) es la que incorpora registros catalogados con un interés bajo en las dimensiones *Perfil geológico* e *Inserción socioeconómica* e interés medio en la *aptitud del terreno*.

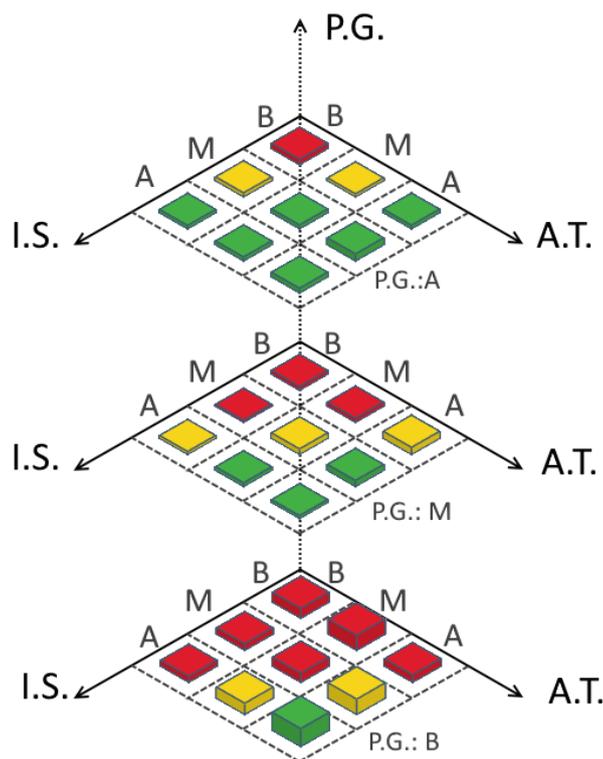


Figura 6.23. Proporción de registros incorporados en cada una de las posibles combinaciones derivadas del cruce de las tres dimensiones consideradas en el análisis para el grupo de los minerales industriales. Elaboración propia.

Huesca es la provincia en la que el número elementos clasificados con un interés bajo es relativamente mayor, con un 73% (Figura 6.24.). En la provincia de Teruel también esta categoría es la que engloba un mayor número de elementos (34%), siendo la menos frecuente la que incorpora elementos clasificados dentro de la clase correspondiente al interés alto. Por el contrario, es esta última categoría es la que comprende un mayor número de puntos en la provincia de Zaragoza (37%).

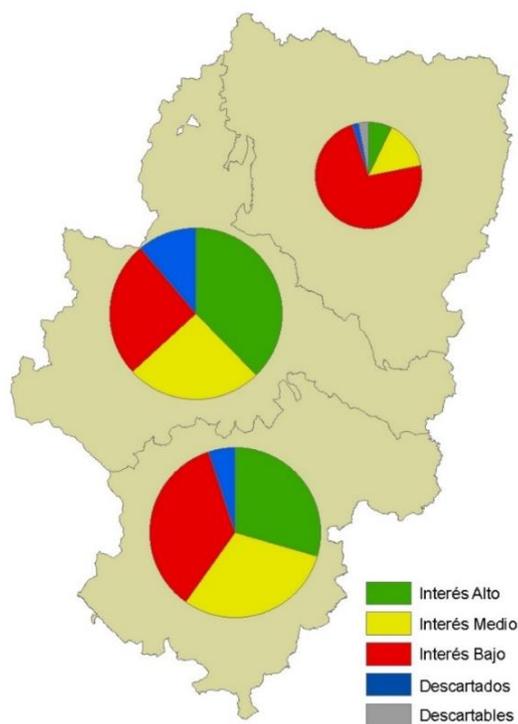


Figura 6.24. Porcentaje de elementos clasificados por interés y provincia para el grupo de los minerales industriales. El tamaño de los círculos es proporcional al número de elementos inventariados. Elaboración propia.

Los minerales metálicos son el grupo en el que el número relativo de elementos catalogados como de interés bajo es más elevado, superando el 45%. Por otra parte, un 23% de los elementos de esta categoría fueron asignados al grupo de interés medio, mientras que un 28% pertenecerán al grupo de interés más alto.

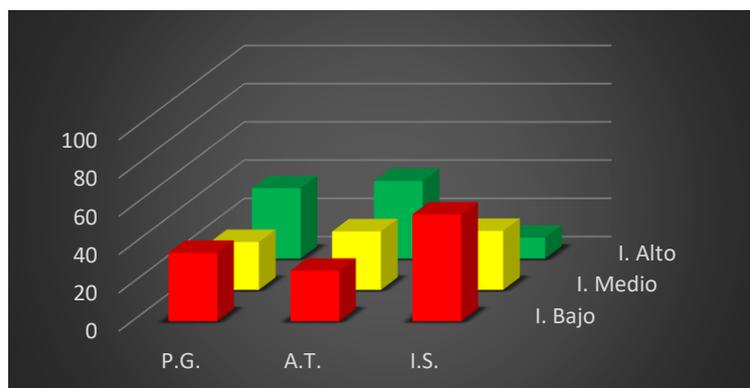


Figura 6.25. Resultados del análisis del potencial minero en cada una de las dimensiones consideradas para los registros relativos a los minerales metálicos. Elaboración propia.

Analizando los resultados obtenidos por los registros de la base de datos correspondientes a este tipo de recursos en cada dimensión de forma individual (Figura 6.25.), puede observarse una clara polarización de los resultados correspondientes al *perfil geológico* ya que un 36% de los mismos obtuvo una valoración negativa en esta dimensión, mientras que el resultado para el 37% de ellos fue positivo. Los resultados logrados por los minerales metálicos en esta dimensión están claramente condicionados por el tipo de recurso analizado, el estado de actividad y su valor estratégico. Así, más del 80% de los registros correspondientes al antimonio, a la bauxita o a la barita fueron calificados como de interés alto, mientras que para otros recursos dominados por los indicios de escaso carácter crítico, los catalogados como de interés bajo eran la amplia mayoría.

En las otras dos dimensiones, los resultados de interés minero obtenidos por los registros correspondientes a minerales metálicos tienden a concentrarse en uno de los extremos. Por ejemplo, en la dimensión *Inserción socioeconómica*, el 56% de los puntos analizados obtuvieron una valoración negativa, mientras que solo un 10% de estos recursos se incorporó a la categoría de interés alto. En el extremo opuesto, el 40% de los registros relativos a minerales metálicos fue calificado como de interés alto en la dimensión *Aptitud del terreno* y un 30% a la categoría de interés medio. No en vano, la combinación más numerosa en la matriz de cruce de las tres dimensiones consideradas en el análisis (Figura 6.26.) es la correspondiente a una valoración de interés bajo en las dimensiones geológica y socioeconómica y un interés alto en la referente al análisis del terreno donde se ubica el yacimiento (8,43%).

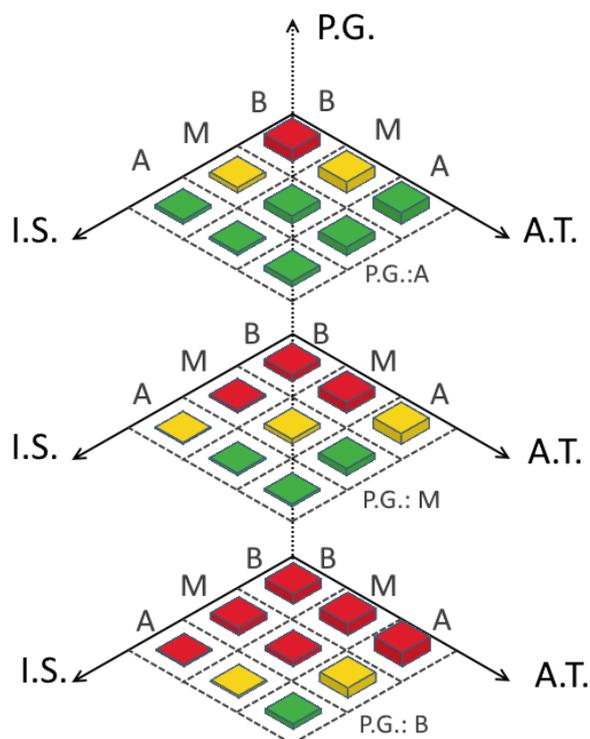


Figura 6.26. Proporción de registros incorporados en cada una de las posibles combinaciones derivadas del cruce de las tres dimensiones consideradas en el análisis para el grupo de los minerales metálicos. Elaboración propia.

A nivel provincial (Figura 6.27.), Teruel es la que muestra un mayor número absoluto de mineralizaciones de tipo metálico clasificadas como de interés alto (126), presentando, además, la mayor frecuencia relativa a nivel provincial (32,9%). Le sigue Zaragoza, con 97, lo que supone un 31,7% de los registrados en la provincia. El porcentaje de elementos metálicos calificados como de interés alto en la provincia de Huesca no alcanza el 4%. Por el contrario, el 84% del total de las mineralizaciones de tipo metálico de la provincia de Huesca han obtenido resultados negativos en el análisis, un valor mucho más elevado que el obtenido por los puntos analizados en Zaragoza (41%) y Teruel (37%).

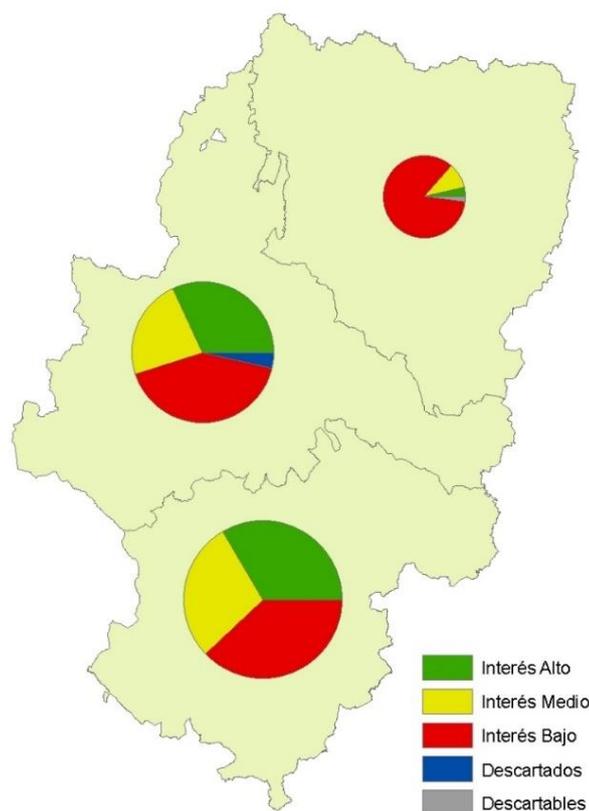


Figura 6.27. Porcentaje de elementos clasificados por interés y provincia para el grupo de los minerales metálicos. El tamaño de los círculos es proporcional al número de elementos inventariados. Elaboración propia.

En el caso de los recursos energéticos, la mayoría de los puntos inventariados (35,2%) obtuvieron un resultado negativo en el análisis propuesto para determinar su interés minero. El 29,7% de estos elementos contenidos en la base de datos fueron clasificados como de interés medio, mientras que el 25,1% obtuvieron el valor más alto (el porcentaje más exiguo correspondiente a registros de interés alto en todos los grupos analizados). Los resultados parciales obtenidos para cada una de las dimensiones que componen el análisis muestran una distribución muy variable entre los tres grupos de interés establecidos (Figura 6.28.). Así, si se considera exclusivamente la dimensión denominada *Perfil geológico* el grupo predominante es el de interés medio (52%) con tan solo un 7% de los registros incluidos dentro de la categoría de interés alto. Por el contrario, en la dimensión *Aptitud del terreno* la mayoría de los registros fueron incorporados al grupo de interés bajo (38%), seguido por el de interés medio (31%), mientras que la *inserción socioeconómica* fue valorada como positiva para casi el 40% de los registros.

No es extraño, por tanto, que en la matriz de cruce de las tres dimensiones consideradas en el análisis (Figura 6.29.), destaque, con mucha diferencia sobre el resto, la combinación correspondiente al interés medio en el *Perfil geológico*, una deficiente *aptitud del terreno* y una *inserción socioeconómica* favorable (15,6%). Le sigue, con un 10,6% la que combina un interés medio en las dimensiones *Perfil geológico* y *Aptitud del terreno* y un interés alto en la correspondiente a la *inserción socioeconómica*.

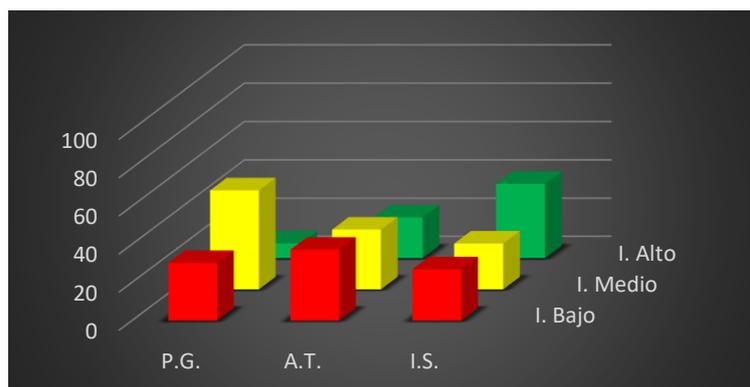


Figura 6.28. Resultados del análisis del potencial minero en cada una de las dimensiones consideradas para los registros relativos a los recursos energéticos. Elaboración propia.

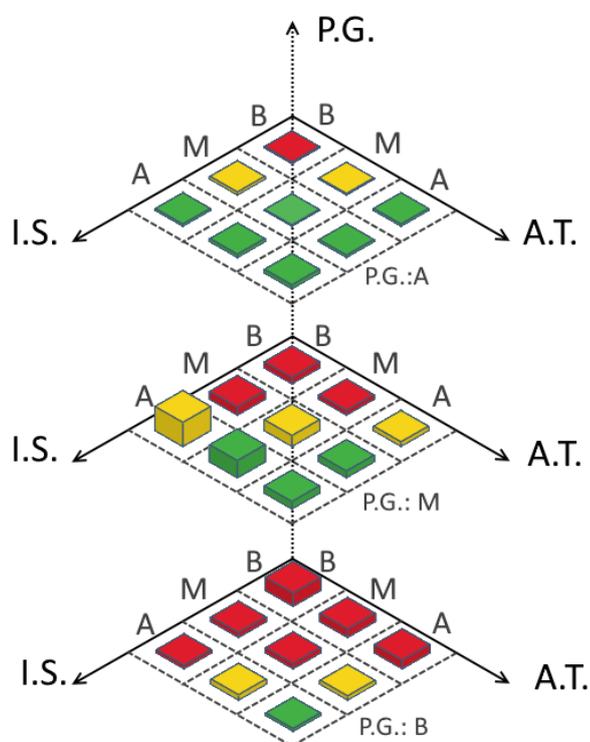


Figura 6.29. Proporción de registros incorporados en cada una de las posibles combinaciones derivadas del cruce de las tres dimensiones consideradas en el análisis para el grupo de los recursos energéticos. Elaboración propia.

Desde un punto de vista espacial, la mayoría de los yacimientos o indicios minerales englobados en la categoría de interés más alto se localizan dentro de la provincia de Teruel (Figura 6.30.). El número exacto de estos elementos en el territorio turolense es de 188, valor que contrasta de forma notable con los que presentan las provincia de Zaragoza (12) y Huesca (2). 53 de los 62 yacimientos de tipo energético presentes en la provincia de Huesca, lo que supone un 85% del total, ha obtenido resultados negativos en este examen. Este porcentaje es sensiblemente menor (56%) en la provincia de Zaragoza, y todavía más bajo en la de Teruel (19%).

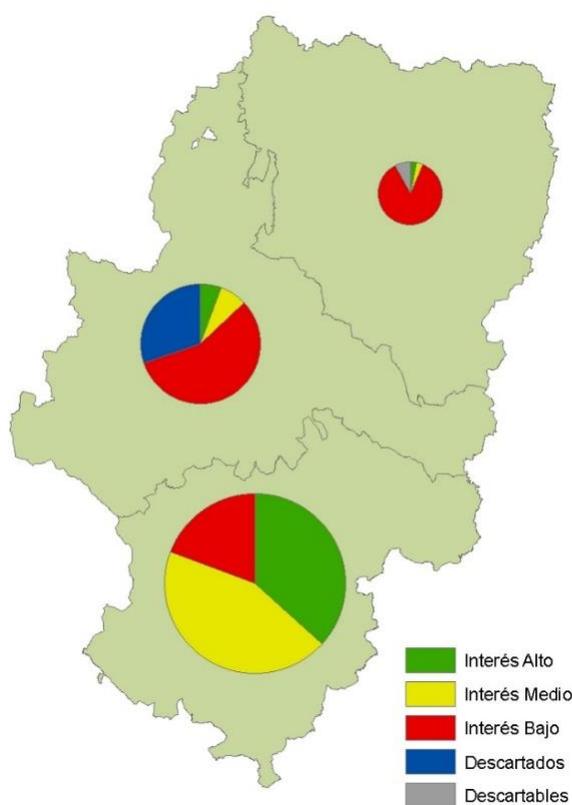


Figura 6.30. Porcentaje de elementos clasificados por interés y provincia para el grupo de los recursos energéticos. El tamaño de los círculos es proporcional al número de elementos inventariados. Elaboración propia.

### 6.2.3. Evaluación global del interés minero de los recursos inventariados. Síntesis regional y provincial de los resultados

En este subapartado serán expuestos los resultados globales obtenidos en el análisis propuesto para la determinación del interés minero por el conjunto de registros que

componen la base de datos generada. Estos resultados globales son mostrados en la Figura 6.31. El dato más interesante es que un 30%, o lo que es lo mismo, 1529 de los más de 5000 elementos que componen el inventario, han sido clasificados dentro de la categoría de interés alto. Cabe recordar que, por los criterios establecidos, en la categoría de interés alto fueron incluidos aquellos puntos que obtuvieron una clasificación positiva en al menos dos de las dimensiones propuestas, o, en el caso de que fueran englobados en la clase correspondiente al interés alto en una de las categorías y de interés medio en las otras dos.

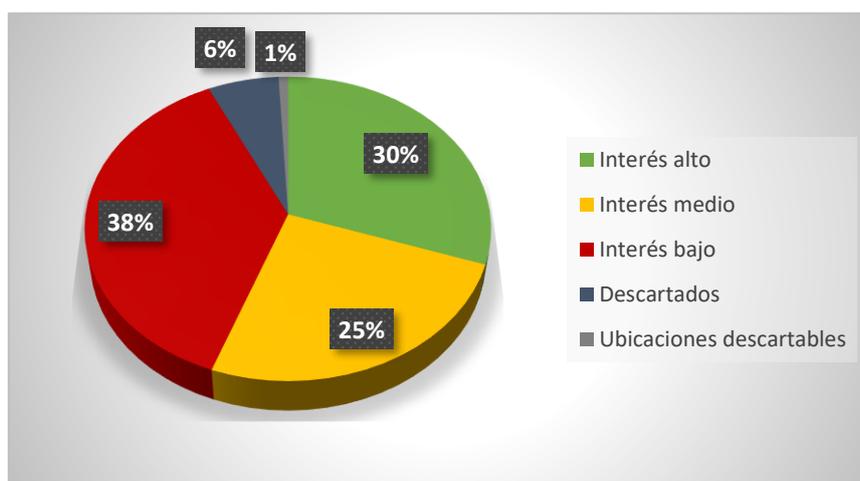


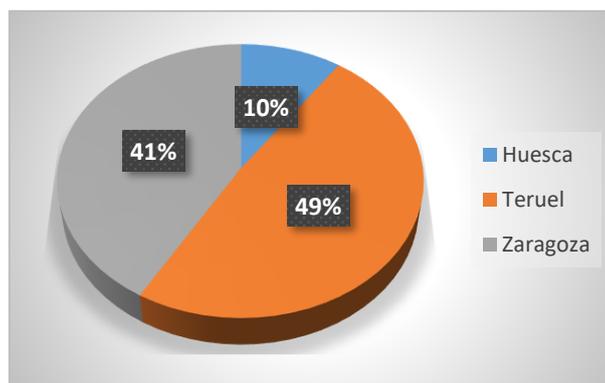
Figura 6.31. Porcentaje de registros de la base de datos asignados a cada categoría de interés. Elaboración propia.

El resto de categorías de interés se reparten, de forma aproximada, un 63% de los elementos inventariados. Concretamente, un 25% de los puntos que componen la base de datos fueron englobados dentro de la categoría de interés medio, mientras que, con un porcentaje netamente superior, 37,41%, y constituyendo el grupo más numeroso, se encuentran los catalogados como de interés bajo. Por su parte, los yacimientos e indicios minerales descartados, es decir, aquellos que gozaron de una concesión de exploración en el pasado que nunca derivó en una labor minera efectiva, superan ligeramente el 6% del total. Finalmente, menos de un 1% de los elementos registrados dentro de la base de datos se localizan dentro de ubicaciones que, por sus características, han sido consideradas como descartables para la ejecución de labores extractivas.

A la vista de los resultados obtenidos y del planteamiento con el que se ejecutó el análisis, que tenía como objetivo comparar los elementos inventariados entre sí dentro de un

contexto geográfico preciso como es la Comunidad Autónoma de Aragón, destaca el hecho de que exista una disparidad tan evidente entre el número de elementos englobados en cada clase de interés. Es decir, en los límites establecidos para la catalogación de los diversos indicadores que componen el inventario, así como en los umbrales fijados para la asignación de cada elemento a un grupo de interés en cada una de las tres dimensiones que contempla el análisis, se intentó que el número de elementos incorporados fuera homogéneo. Por este motivo, podría esperarse que los resultados finales fueran más semejantes entre las tres categorías de interés propuestas.

A nivel provincial, los elementos del inventario que han obtenido un valor de interés alto se concentran, principalmente, en Teruel (Figura 6.32.). 747 de los 1529 puntos calificados con un potencial alto, casi el 50%, se localizan en esta provincia. Zaragoza concentra un 41% de los elementos de alto interés de la comunidad, mientras que para la provincia de Huesca este porcentaje roza el 10%.



*Figura 6.32. Porcentaje de registros clasificados con un interés alto por provincias. Elaboración propia.*

La distribución provincial de los elementos clasificados con un interés bajo es mucho más uniforme (Figura 6.33.). La mayoría de estos puntos se encuentran dentro de los límites provinciales de Zaragoza (698) y Teruel (727), lo que supone un 37% y un 38%, respectivamente. El menor número de elementos inventariados en la provincia de Huesca, hace que el porcentaje relativo a esta provincia sea solo del 25%.

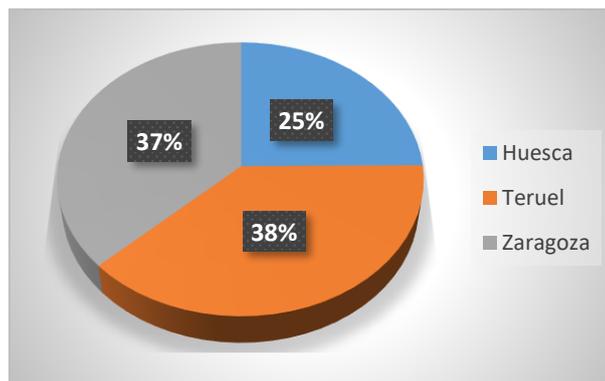


Figura 6.33. Porcentaje de registros clasificados con un interés bajo por provincias. Elaboración propia.

Por otro lado, 16 de los puntos correspondientes a mineralizaciones localizados dentro de la provincia de Teruel lo hacen en ubicaciones consideradas como descartables para la actividad minera. Le siguen la provincia de Huesca, con 15, y finalmente, Zaragoza con 11.

Si se comparan entre sí los resultados obtenidos para cada provincia (Figura 6.34.) puede observarse como es Teruel la que presenta un número relativo más elevado de elementos clasificados como de interés alto (32%). Este porcentaje es similar para la provincia de Zaragoza, que supera el 31%, mientras que en Huesca no alcanza el 20%. Es precisamente en esta provincia en la única en la que los elementos que han obtenido resultados negativos superan el 50%. No en vano, y tal y como puede observarse en los mapas incorporados en el Anexo I, donde se ofrece una categorización del territorio según los criterios empleados en el análisis para las dos dimensiones ligadas al territorio, es decir, la *aptitud del terreno* y la *inserción socioeconómica*, gran parte de la provincia de Huesca, fue incluida dentro de la categoría más baja en al menos una de las dimensiones, o en ambas en su mitad septentrional.

En Zaragoza (10%) y en Teruel (5%) el número de elementos descartados alcanza un porcentaje notable, mientras que la provincia de Huesca, con un 2%, muestra el porcentaje más elevado de puntos ubicados dentro de localizaciones descartables.

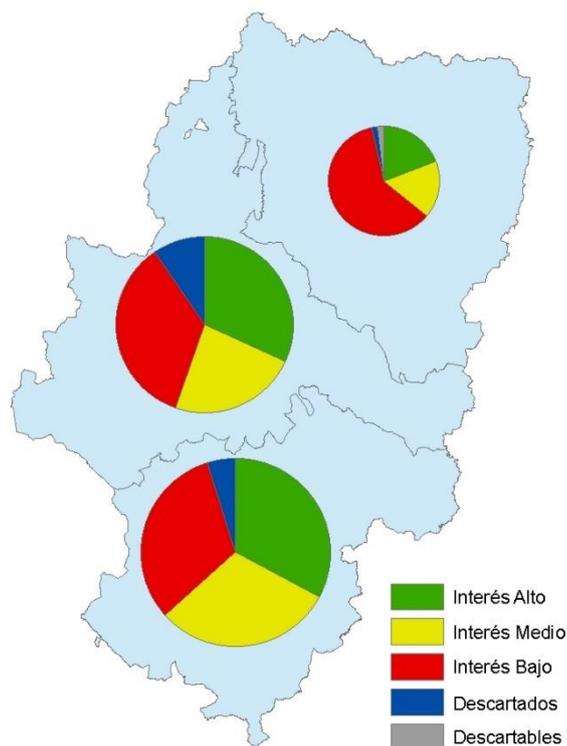


Figura 6.34. Porcentaje de elementos clasificados por interés y provincia. El tamaño de los círculos es proporcional al número de elementos inventariados. Elaboración propia.

### 6.3. EL POTENCIAL MINERO DE ARAGÓN. RESULTADOS RELATIVOS A UNA SELECCIÓN DE RECURSOS

A continuación se presentarán los resultados obtenidos en el análisis minero por algunos de los elementos que constituyen la base de datos, prestando una especial atención a los recursos considerados como críticos por la Unión Europea y a las formaciones geológicas susceptibles de ser explotadas mediante la técnica conocida como fractura hidráulica. El resto de los elementos fueron seleccionados por su interés en un contexto de sostenibilidad y de competencia global, atendiendo a diversos factores, como su interés económico, su valor estratégico o su especial relevancia en la historia minera regional.

Los mapas que acompañan el análisis de los resultados de potencialidad minera obtenidos en el estudio realizado son un ejemplo de las posibilidades cartográficas que ofrece la base de datos generada referente a los recursos mineros y a las aguas de Aragón. En dichos mapas, para cada recurso concreto será incluida información referente al

comportamiento del territorio en uno o varios de los indicadores manejados en el análisis, seleccionados en función de su relevancia y su relación con el recurso descrito.

### 6.3.1. Alabastro (Rocas ornamentales)

Dentro de las rocas ornamentales, el alabastro es el recurso que cuenta con un mayor número de registros en la base de datos y, justo después de la losa caliza, el que presenta más labores en explotación en la actualidad. Más de la mitad de los registros inventariados referentes al alabastro fueron agrupados dentro de la categoría de interés alto, mientras que un porcentaje netamente inferior (21%) fue calificado como de interés medio. Por otra parte, 33 de los más de 300 elementos inventariados fueron asignados a la categoría de interés bajo y para otros 33 fue descartada su explotación (Figura 6.35.).

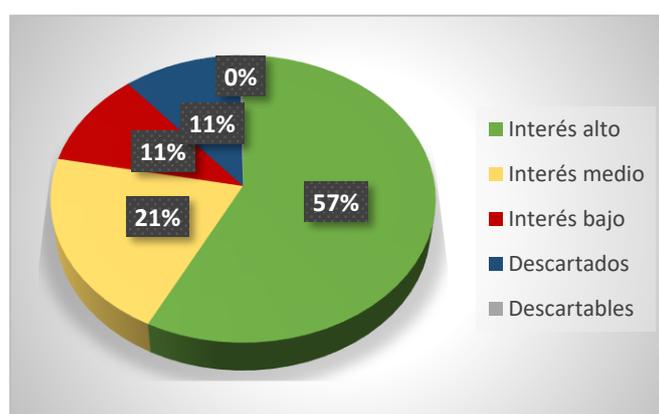


Figura 6.35. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes al alabastro. Elaboración propia.

Estos buenos resultados derivan, fundamentalmente, de una *aptitud del terreno* propicia para el desarrollo de la actividad minera, así como de una adecuada *inserción socioeconómica* (Figura 6.36.). En cada una de estas dos dimensiones, dos de cada tres elementos registrados en la base de datos obtuvieron la valoración de interés alto. En cambio, un 67% de los puntos inventariados fue calificado como de interés bajo en la dimensión *Perfil geológico*. De este modo, casi un 40% de los registros correspondientes al alabastro se ajusta exactamente a las condiciones de interés apenas descritas en las tres dimensiones que componen el análisis, es decir, un interés bajo en el *perfil geológico* y alto en las otras dos dimensiones.

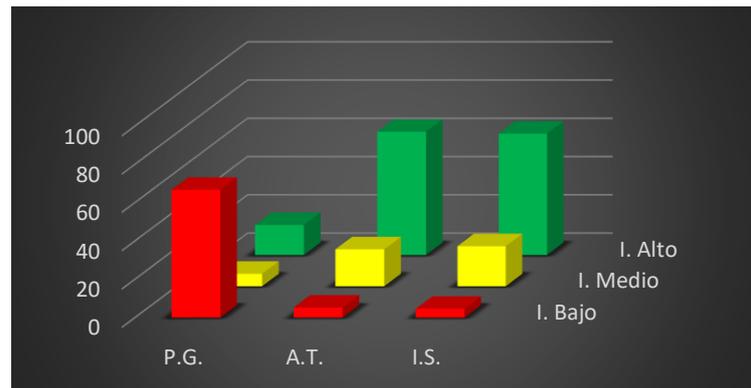


Figura 6.36. Resultados del análisis del potencial minero en cada una de las dimensiones consideradas para los registros relativos al alabastro. Elaboración propia.

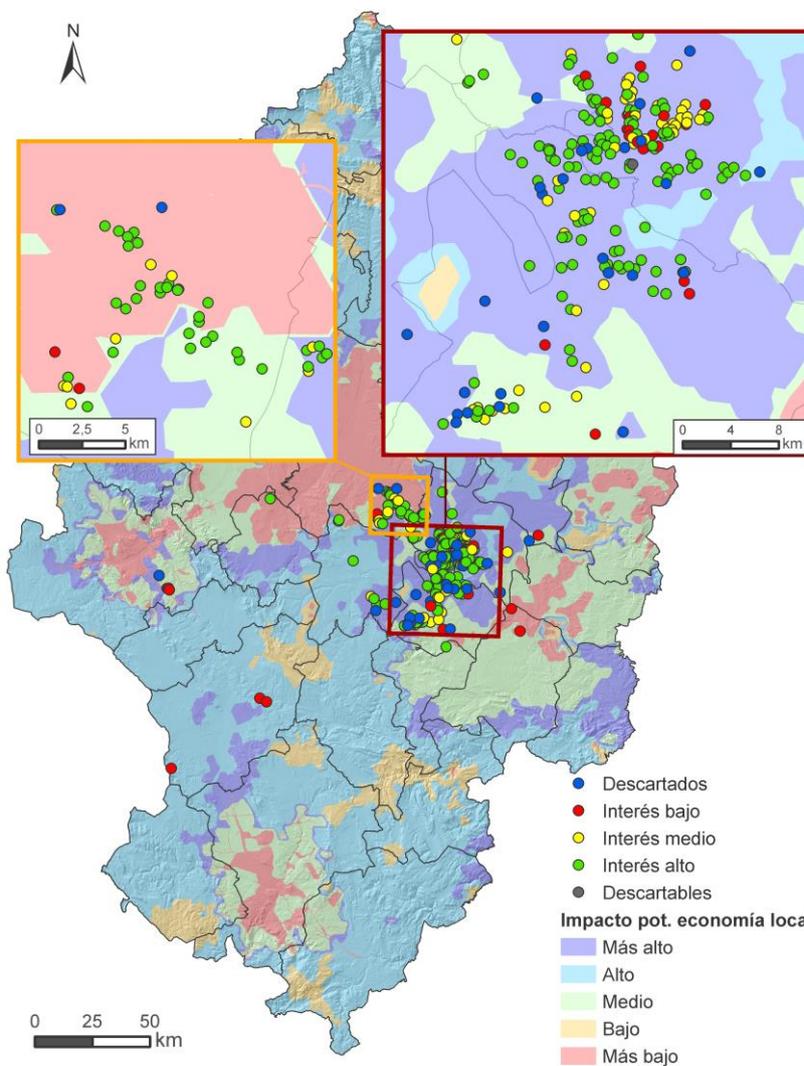


Figura 6.37. Distribución espacial de los resultados obtenidos por los registros de alabastro en la base de datos. Elaboración propia.

Aunque pueden localizarse algunos registros referentes al alabastro en algunas áreas de la Cordillera Ibérica turolense y zaragozana, estos no han obtenido resultados destacables en el análisis del potencial minero propuesto (Figura 6.37.). La mayor parte de los puntos inventariados relativos al alabastro se localizan en la depresión del Ebro y en partes del somontano de la Ibérica, concentrados, principalmente, en tres comarcas aragonesas pertenecientes a las provincias de Zaragoza y Teruel (Denominación Comarcal de Zaragoza, Ribera Baja del Ebro y Bajo Martín). Los resultados obtenidos por los elementos de la base de datos registrados en cada una de estas tres comarcas son muy similares, dominando en todas ellas los calificados dentro del grupo de interés más alto. Fuera de estas comarcas, existen registros de interés alto en el Campo de Belchite y en el Campo de Cariñena.

Los resultados obtenidos por los elementos inventariados en función de su estado de actividad son muy diversos (Figura 6.38.). Por un lado, destaca el hecho de que todos los registros que representan explotaciones activas en la actualidad hayan obtenido la calificación máxima en la evaluación de su interés minero. Este porcentaje se reduce ligeramente en los registros relativos a derechos mineros otorgados, estado de actividad en el que los calificados como de interés alto supera el 92%. Esta categoría sigue dominando entre los indicios y las antiguas explotaciones de alabastro, si bien en estos estados los calificados con un interés bajo superan el 10%.

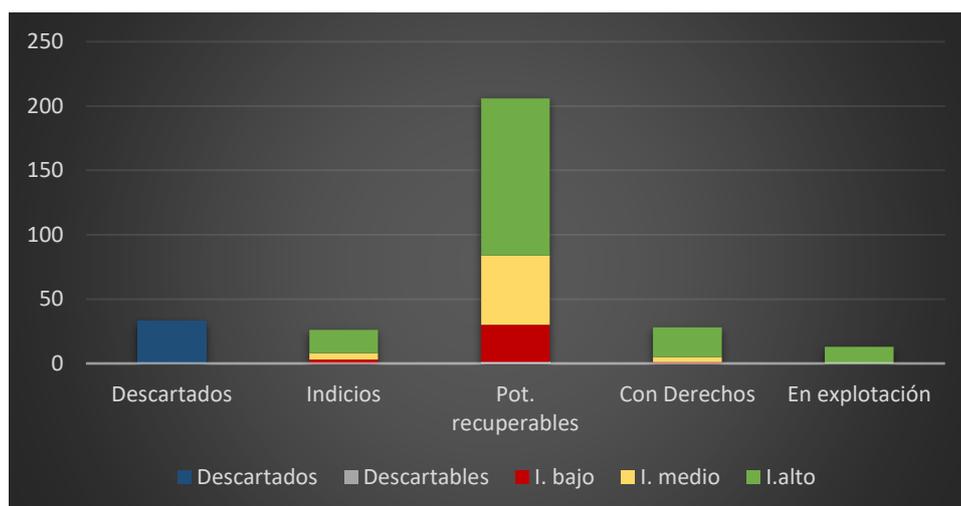


Figura 6.38. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes al alabastro, agrupados por estado de actividad. Elaboración propia.

### 6.3.2. Gravas (Rocas industriales)

Las gravas son, con mucha diferencia sobre el resto, el recurso que cuenta con una mayor cantidad de registros en la base de datos y uno de los que se distribuye más homogéneamente por el territorio aragonés, si bien, como se analizó en el capítulo III de la tesis, las explotaciones tienden a concentrarse en los cauces de los ríos cerca de los núcleos poblados. Los resultados globales del análisis al que fueron sometidos los registros incluidos en la base de datos correspondientes a las gravas se muestran en la Figura 6.39. Casi el 45% de los puntos inventariados han sido calificados como de interés bajo, siendo la categoría predominante. Los elementos incluidos en el grupo de interés medio alcanzan el 26% del total, mientras que 215 de los más de 700 registros evaluados fueron incorporados a la categoría de interés alto. Por otro lado, 9 de los puntos inventariados se encontraban en ubicaciones descartadas para la actividad minera.

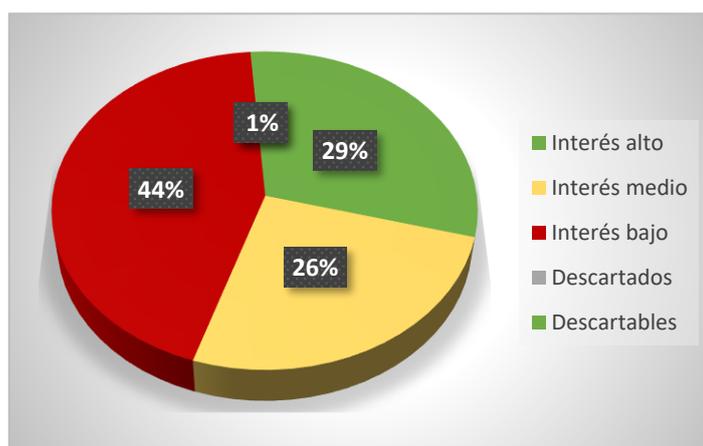


Figura 6.39. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes a las gravas. Elaboración propia.

Atendiendo a los resultados del análisis realizado, una importante proporción de las ubicaciones donde este recurso ha sido localizado presenta una actitud del terreno deficiente para el desarrollo de la actividad minera, considerando los malos resultados obtenidos en la dimensión *Aptitud del terreno* (el 63,6% fueron asignados a la categoría de interés bajo frente el 15,7% de interés alto). En las otras dos dimensiones los resultados fueron más semejantes en relación con el número de elementos incorporados a cada categoría de interés, si bien en ambas el interés alto es el predominante (Figura 6.40.).

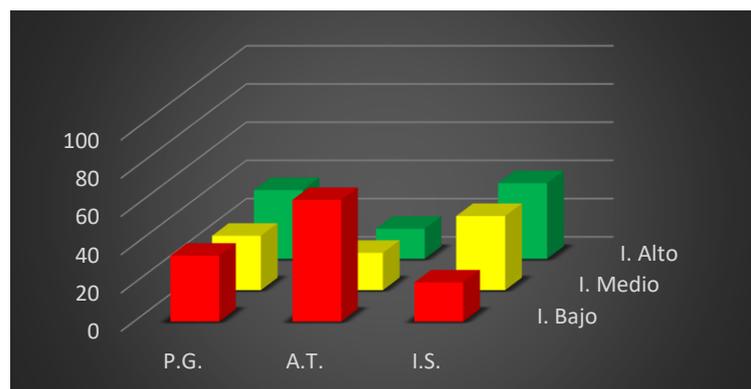


Figura 6.40. Resultados del análisis del potencial minero en cada una de las dimensiones consideradas para los registros relativos a las gravas. Elaboración propia.

En el mapa que muestra los resultados obtenidos en el análisis por los puntos inventariados, y que se representa en la Figura 6.40., la distribución en el territorio de las diferentes categorías establecidas es bastante homogénea, pudiendo encontrar ejemplares pertenecientes a cada una de ellas a lo largo y ancho de la región. No obstante, existen ciertas acumulaciones de puntos pertenecientes a la misma categoría de interés en algunas áreas concretas del mapa de las que se pueden extraer ciertas conclusiones. Por un lado, la gran mayoría de los elementos registrados en la geobase de datos en el norte de la provincia de Huesca pertenecen a la categoría de interés más bajo. Esta calificación está relacionada con problemas de inserción en el territorio y a una aptitud del terreno pobre. En esta misma provincia, los elementos situados al sur de las Sierras Exteriores muestran una valoración global mucho más alta, especialmente los localizados en los cauces de los ríos Cinca y Alcanadre.

Otro punto de interés es el entorno de la ciudad de Zaragoza, donde, especialmente en la parte alta del río Ebro y en el curso final del Gállego, se acumulan una gran cantidad de registros catalogados en diferentes niveles de interés en un área reducida y, esencialmente, homogénea. En este caso, el factor diferencial que determinará la pertenencia a uno u otro nivel de interés está relacionado con el tamaño de las reservas, que juega un papel clave en la dimensión *Perfil geológico*. Por otro lado, los registros localizados en el valle del río Ebro adquieren una valoración global más positiva conforme se alejan, aguas arriba o aguas abajo, de la ciudad de Zaragoza. Dentro de esta provincia, el valle del río Jalón registra unos resultados muy positivos para un número considerable de puntos. Finalmente, en la

provincia de Teruel no se aprecian agrupaciones de registros con una valoración similar que hagan predecir la existencia de factores ambientales o socioeconómicos que condicionen los resultados finales.

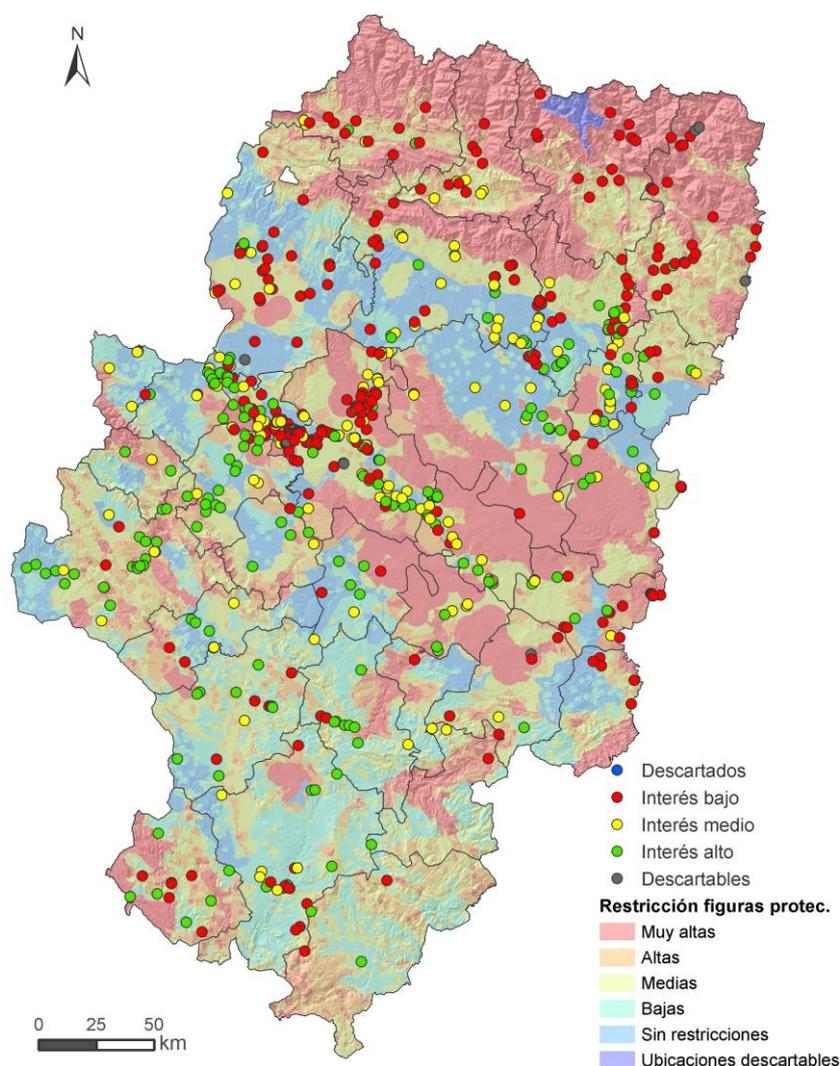


Figura 6.41. Distribución espacial de los resultados obtenidos por los registros de gravas en la base de datos. Elaboración propia.

Los resultados obtenidos en el análisis presentan grandes variaciones según el estado de actividad en el que se encuentran los puntos inventariados (Figura 6.42.). De este modo, los elementos considerados de interés alto aumentan progresivamente desde poco más del 20% en indicios y antiguas explotaciones hasta casi el 70% en las labores activas. El porcentaje de elementos incorporados dentro de la categoría de interés más bajo también muestra una disminución progresiva según el estado de actividad y es mínimo entre las explotaciones activas.

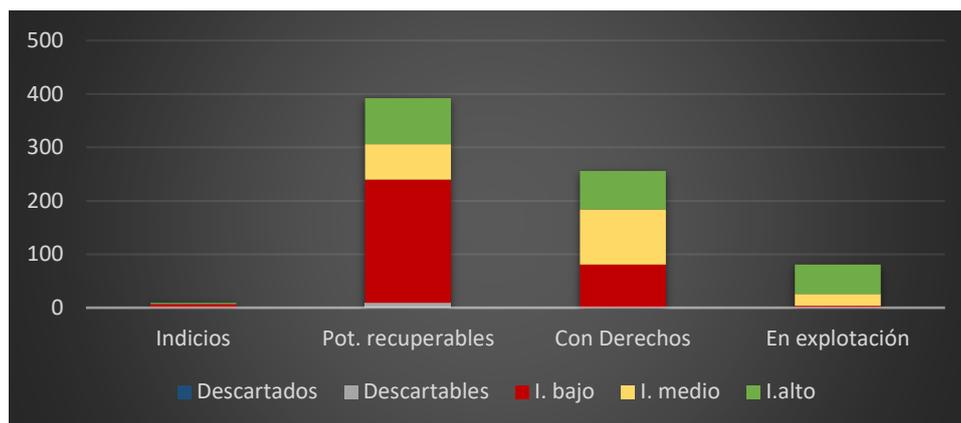


Figura 6.42. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes a las gravas, agrupados por estado de actividad. Elaboración propia.

### 6.3.3. Arcillas (Rocas industriales)

Las arcillas son otro de los recursos que agrupan una gran cantidad de puntos en la base de datos, además de ser, como se vio en el apartado III de la tesis, una fuente económica importante para la provincia de Teruel, puesto que parte de la producción es exportada a otras provincias españolas e, incluso, al extranjero. A pesar de haberse incluido en la base de datos hasta siete tipos de arcillas diferentes, cada una de ellas con unas características propias, en este epígrafe se mostrarán los resultados correspondientes a las arcillas comunes, por ser las más numerosas y además mostrar unos resultados más heterogéneos.

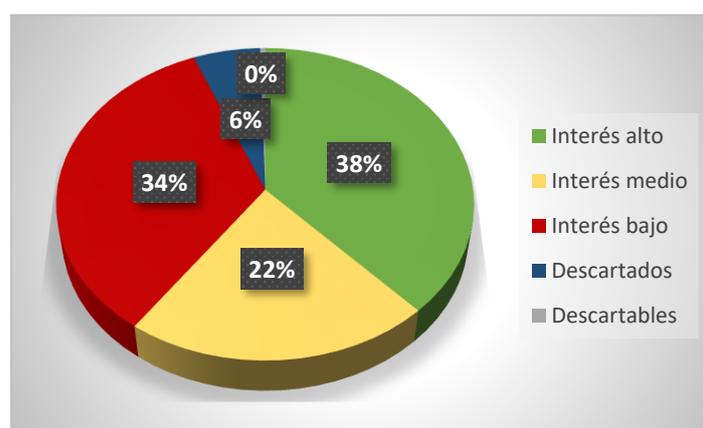


Figura 6.43. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes a las arcillas. Elaboración propia.

La categoría que congrega un mayor número de puntos inventariados es la correspondiente al interés alto (Figura 6.43.). Exactamente, 87 de los 229 registros de arcillas

en la base de datos corresponden a esta categoría. El grupo de interés bajo, por su parte, incorpora 78 entidades, y 50 el de interés medio. Por otro lado, el 6% de los elementos inventariados fueron descartados, mientras que uno se localizaba dentro de una ubicación descartable.

Los resultados obtenidos por las arcillas en las tres dimensiones que componen el análisis son muy similares entre sí (Figura 6.44.), si bien en cada una de ellas destacan uno o dos grupos de interés sobre el resto. Así, los elementos categorizados dentro del interés medio en la dimensión *Aptitud del terreno* incorporan un 37% de los registros analizados correspondientes a la arcilla, por un 30% de interés alto y un 25% de interés bajo. Por su parte, un 37% de las arcillas obtuvieron una valoración positiva en la dimensión que valora la *inserción socioeconómica*, destacando sobre el resto de las categorías de interés. En el caso de la dimensión *Perfil geológico*, las categorías correspondientes al interés bajo y al interés alto están formadas por un número similar de elementos, con 82 y 83 registros respectivamente. No obstante, conviene destacar que el número de puntos calificados con un potencial elevado en todas las dimensiones que componen el análisis es extraordinariamente alto (10%), siendo la categoría más poblada dentro de la matriz que incorpora todos los posibles cruces entre estas tres dimensiones.

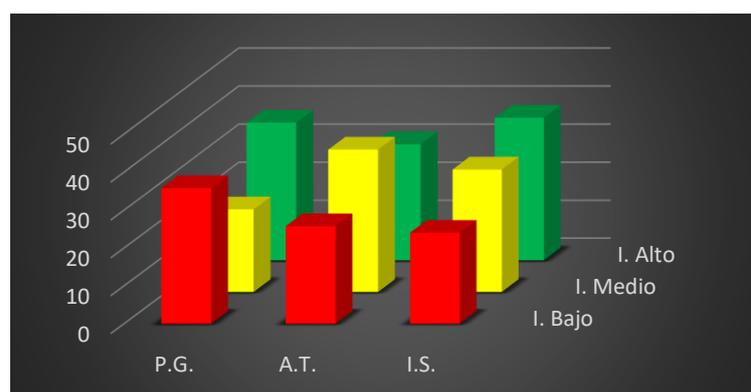


Figura 6.44. Resultados del análisis del potencial minero en cada una de las dimensiones consideradas para los registros relativos a las arcillas. Elaboración propia.

La mayoría de los registros de arcillas se concentran en el sector centro-oriental de la provincia de Teruel, en los dominios de la Cordillera Ibérica (Figura 6.45.). Sin embargo, los resultados obtenidos por estos puntos son muy diferentes en función de su localización. Así, por ejemplo, mientras que los localizados en la comarca de Andorra-Sierra de Arcos han

logrado una calificación global muy favorable, la mayor parte de los ubicados en la vecina Sierra del Maestrazgo han sido incluidos dentro del grupo de interés más bajo, debido, principalmente, a factores de tipo ambiental.

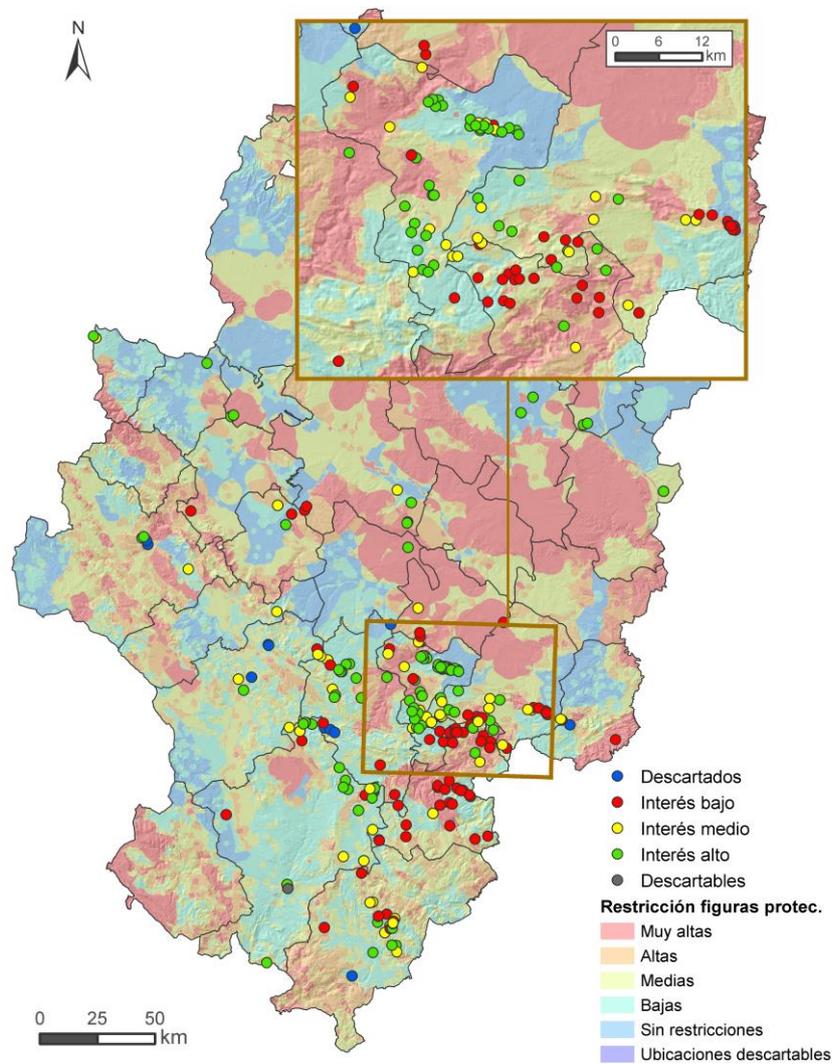


Figura 6.45. Distribución espacial de los resultados obtenidos por los registros de arcillas en la base de datos. Elaboración propia.

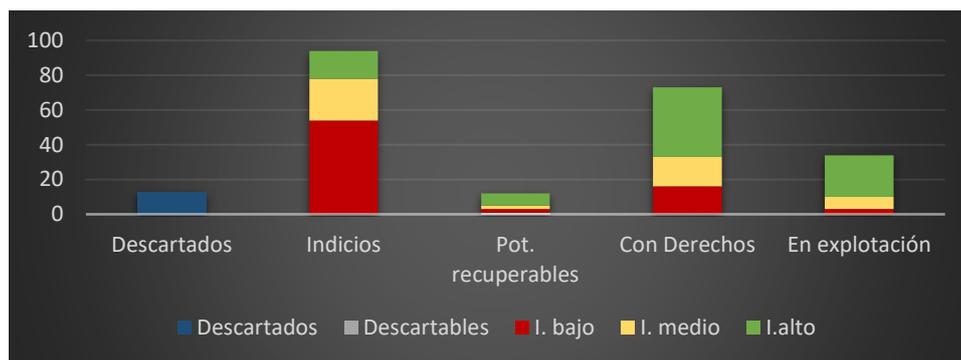


Figura 6.46. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes a las arcillas, agrupados por estado de actividad. Elaboración propia.

Los indicios son el grupo que presenta un mayor número de elementos englobados dentro de la categoría de interés más bajo (Figura 6.46.), con casi un 60%. En las categorías correspondientes a los potencialmente recuperables y a los derechos mineros otorgados este porcentaje desciende a menos del 20%. La proporción más alta de elementos de interés alto se da en las explotaciones actuales, donde alcanzan el 65% del total. Este porcentaje desciende ligeramente en las antiguas explotaciones y en los derechos mineros otorgados y más drásticamente entre los indicios, grupo en el que no suponen ni el 20% del total.

#### 6.3.4. Yeso (Minerales industriales)

El yeso es el recurso perteneciente a la categoría de los minerales industriales más numeroso en términos de elementos inventariados en la base de datos. Es además el que cuenta con un mayor número de labores activas en el territorio. Los resultados globales obtenidos por los registros referentes a este recurso en el análisis de interés no muestran un panorama muy positivo (Figura 6.47.), puesto que el 42% de los registros fue catalogado como de interés bajo, por un 32% valorado positivamente.

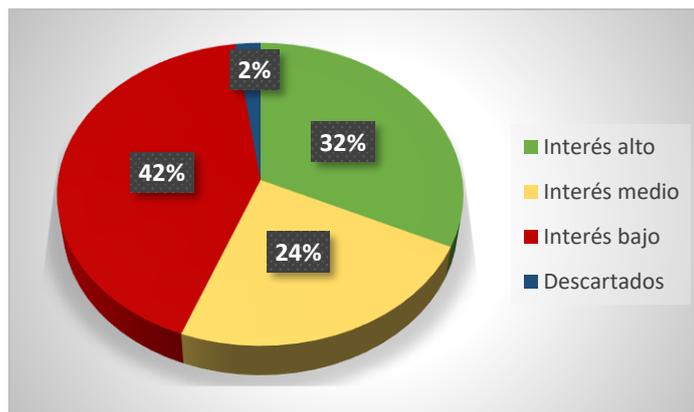


Figura 6.47. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes al yeso. Elaboración propia.

La mayor parte de los puntos inventariados relativos a indicios, yacimientos y explotaciones de yeso se localizan en la depresión del Ebro y en algunos tramos de la Cordillera Ibérica (Figura 6.48.). En la comarca de la Ribera Baja del Ebro existe una agrupación notable de puntos inventariados, muchos de ellos correspondientes con explotaciones activas y derechos mineros, en los que dominan las clases de interés media y alta. Se trata de un área en la que los factores ambientales y socioeconómicos son apropiados para el ejercicio de la minería, según los criterios empleados en el análisis. En el resto de la depresión del Ebro los resultados, en conjunto, no son tan favorables. Tampoco lo son los obtenidos en otras áreas de la región, como el Sistema Ibérico o el somontano pirenaico. Así, en comarcas como la del Jiloca (Sistema Ibérico) o La Litera y el Cinca Medio (somontano pirenaico) existen concentraciones de registros catalogados como de interés bajo, al tratarse, la mayoría de ellos, de indicios y antiguas explotaciones en las que las reservas son escasas.

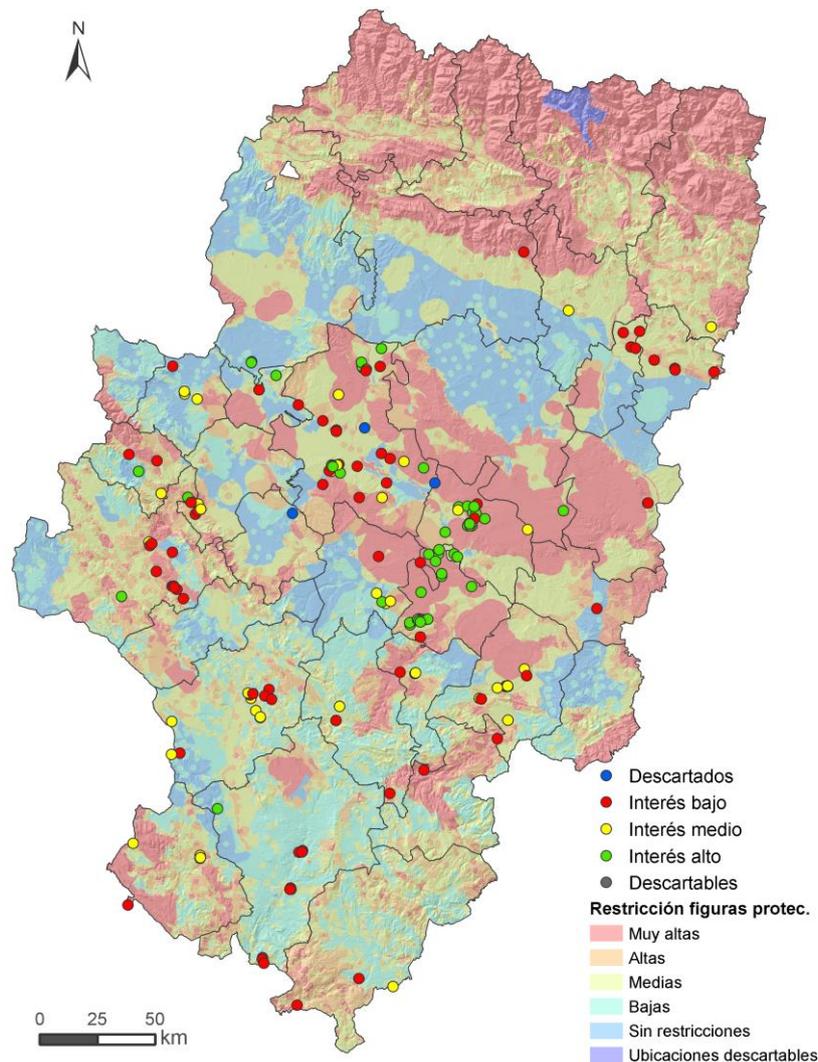


Figura 6.48. Distribución espacial de los resultados obtenidos por los registros correspondientes a los yesos. Elaboración propia.

Los resultados finales mostrados en la Figura 6.47. están fuertemente condicionados por las categorías de interés a las que fueron asignados los puntos correspondientes a indicios y, especialmente, a las antiguas labores de yeso (Figura 6.49.). Estos dos estados de actividad son los que concentran un mayor número de registros en la base de datos, siendo los resultados obtenidos por estas dos categorías en el análisis de interés muy pobres. En los indicios, casi el 50% de los elementos analizados fueron incluidos en la categoría de interés bajo, mientras que el resto fueron incorporados a la de interés medio. Un porcentaje similar de elementos de interés bajo presentan los puntos agrupados en la categoría que incorpora las antiguas explotaciones, si bien en términos absolutos, el número de puntos incluidos es mucho mayor que en el caso de los indicios (61 frente a 15 de los indicios). Un número

menor de puntos referentes a este estado de actividad, 29, fue calificado como de interés medio, mientras que 39 fueron incluidos dentro del grupo de interés alto.

Todos los registros referentes a labores de yeso que se encuentran en explotación en el momento actual obtuvieron resultados positivos en el análisis propuesto, mientras que el 44% de los derechos mineros presentes en el catastro fueron incluidos dentro de esta categoría de interés.

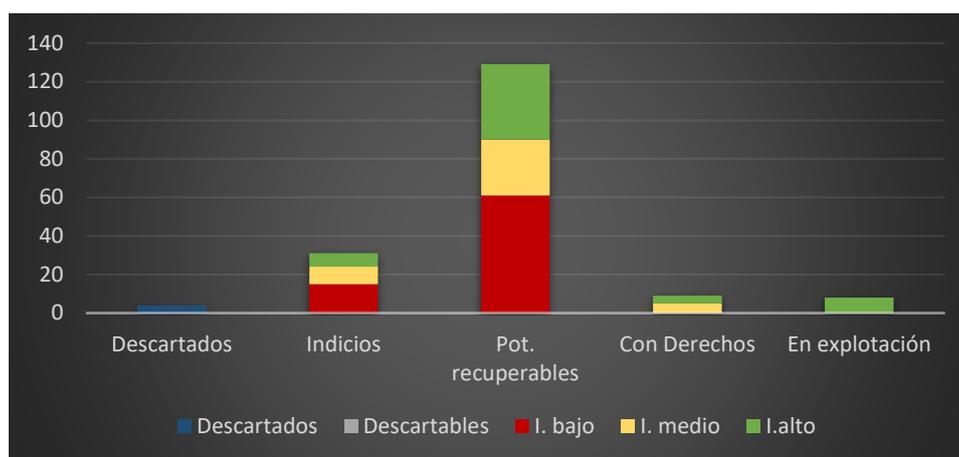


Figura 6.49. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes al yeso, agrupados por estado de actividad. Elaboración propia.

### 6.3.5. Caolín (Minerales industriales)

El caolín, una arcilla rica en caolinita, es uno de los recursos analizados por la Unión Europea en el estudio sobre los materiales críticos, si bien este no superaba los umbrales establecidos en ninguno de los criterios empleados. Dentro del grupo de los minerales industriales, el caolín cuenta con un elevado número de puntos inventariados, solo superado por el yeso. Uno de cada tres de los puntos registrados relativos al caolín pertenece a la categoría de interés alto, según el análisis propuesto (Figura 6.50.). Este porcentaje es ligeramente superior en el caso de los calificados como de interés bajo (36%) y levemente inferior en el de interés medio (30%).

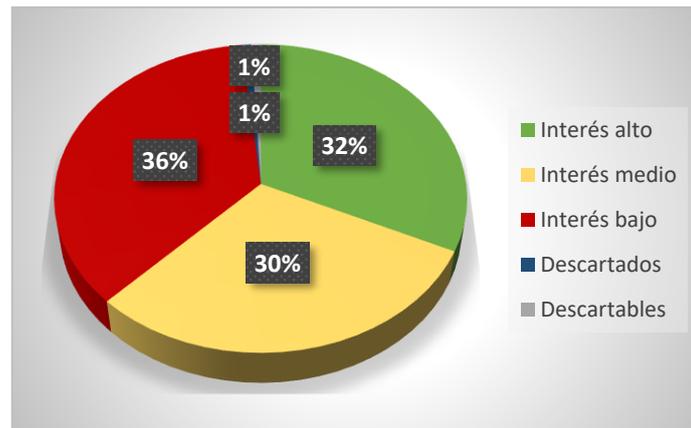


Figura 6.50. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes al caolín. Elaboración propia.

Dentro de las dimensiones consideradas en el análisis de potencial minero, los registros relativos al caolín se distribuyen de manera homogénea entre las diferentes categorías de interés, si bien en las denominadas *Aptitud del terreno* e *Inserción socioeconómica* existe un cierto predominio de los puntos de interés medio (Figura 6.51.).

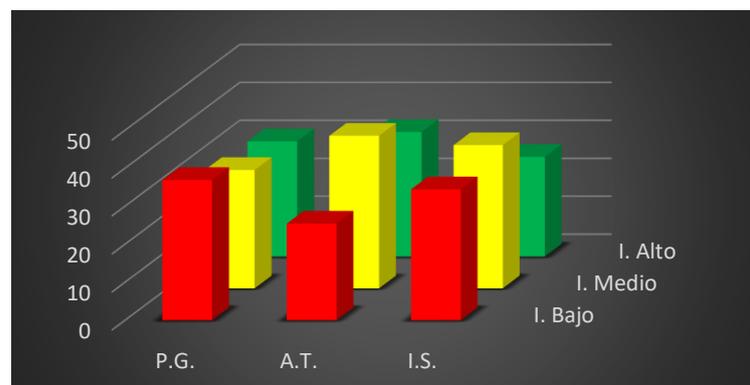


Figura 6.51. Resultados del análisis del potencial minero en cada una de las dimensiones consideradas para los registros relativos al caolín. Elaboración propia.

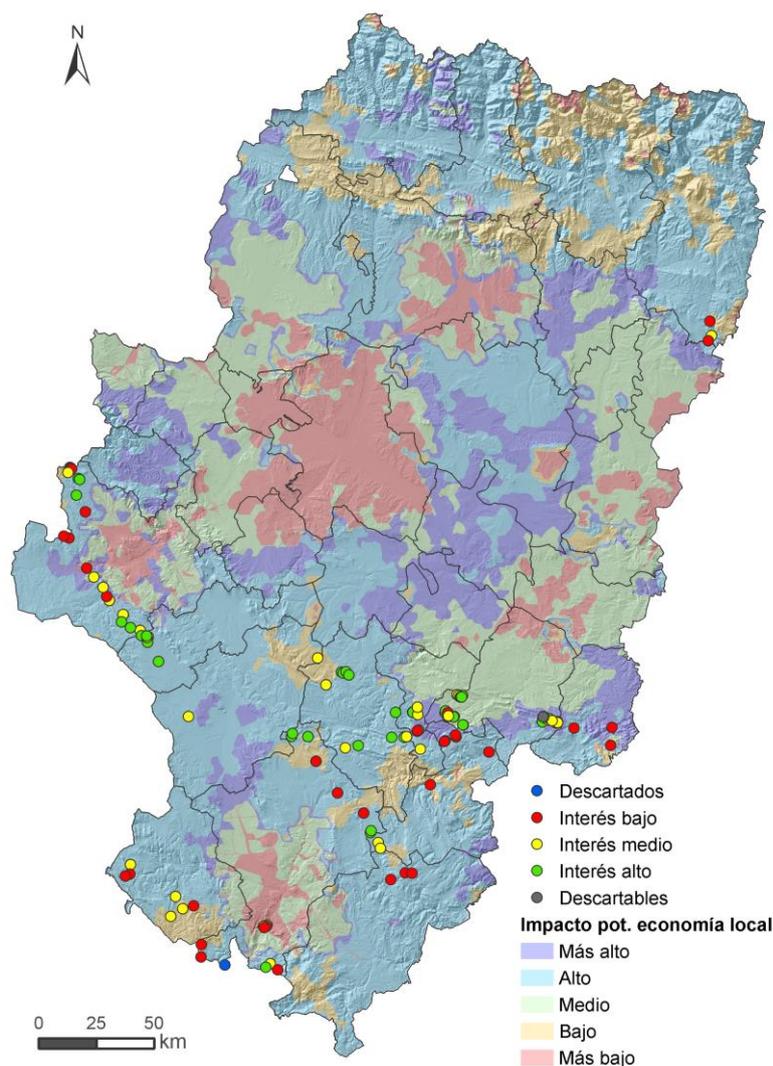


Figura 6.52. Distribución espacial de los resultados obtenidos por los registros correspondientes al caolín. Elaboración propia.

La distribución espacial de estos resultados no presenta un patrón tan definido como el de otros recursos analizados, aunque los registros que conforman la categoría de interés alto aparecen agrupados en algunas pequeñas áreas de la región, como el límite entre la Comunidad de Calatayud y el Campo de Daroca, en el norte de la comarca de la Comunidad de Teruel y en las Cuencas Mineras (Figura 6.52.). En el resto de la Comunidad de Calatayud, la Sierra de Albarraçín, la comarca del Matarraña y el sur de La Litera los resultados obtenidos corresponden, principalmente, a las categorías de interés medio y bajo.

Por otra parte, los resultados obtenidos en el análisis son muy homogéneos si se analizan en función del estado de actividad al que corresponde cada registro de la base de datos (Figura 6.53.), especialmente en el número relativo de elementos incorporados a la categoría

de interés alto, que ronda el 20% tanto en los indicios como en las antiguas explotaciones, si bien alcanzan un 30% entre los derechos otorgados. En términos absolutos, la categoría de interés medio es la que incorpora un mayor número de registros entre los indicios de caolín.

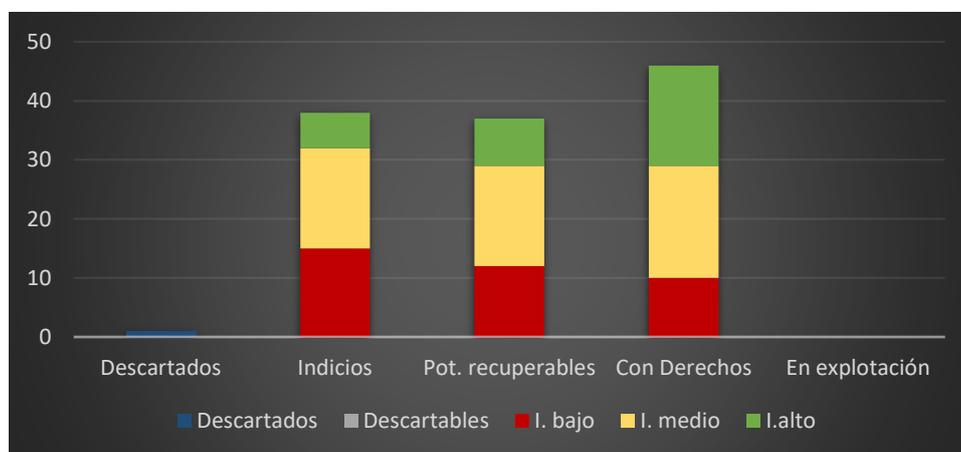


Figura 6.53. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes al caolín agrupados por estado de actividad. Elaboración propia.

### 6.3.6. Bauxita (Minerales metálicos)

La bauxita, principal mena de aluminio, es un mineral para el que la Unión Europea considera que existe un riesgo importante en el suministro procedente de fuentes externas. En Aragón se han inventariado seis puntos relacionados con la bauxita, tres de los cuales se corresponden con antiguas explotaciones, dos con derechos mineros presentes en el catastro y uno con un indicio. Todos estos registros se ubican en las comarcas más orientales de la provincia de Teruel: el Bajo Aragón y el Matarraña (Figura 6.55.).

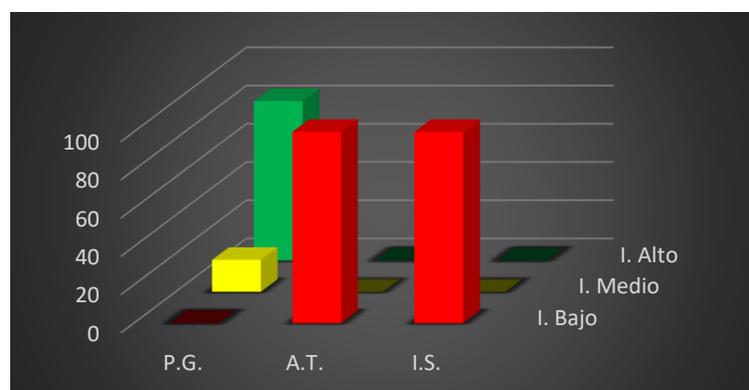


Figura 6.54. Resultados del análisis del potencial minero en cada una de las dimensiones consideradas para los registros relativos a la bauxita. Elaboración propia.

Todos los puntos inventariados, con independencia de su estado de actividad fueron calificados como de interés bajo. En todos los casos estudiados, esta calificación deriva de una pobre *inserción socioeconómica* y de una *aptitud del terreno* inadecuada, a pesar de que las características económicas de los yacimientos y del valor estratégico de la bauxita si fueran las propicias (Figura 6.54.).

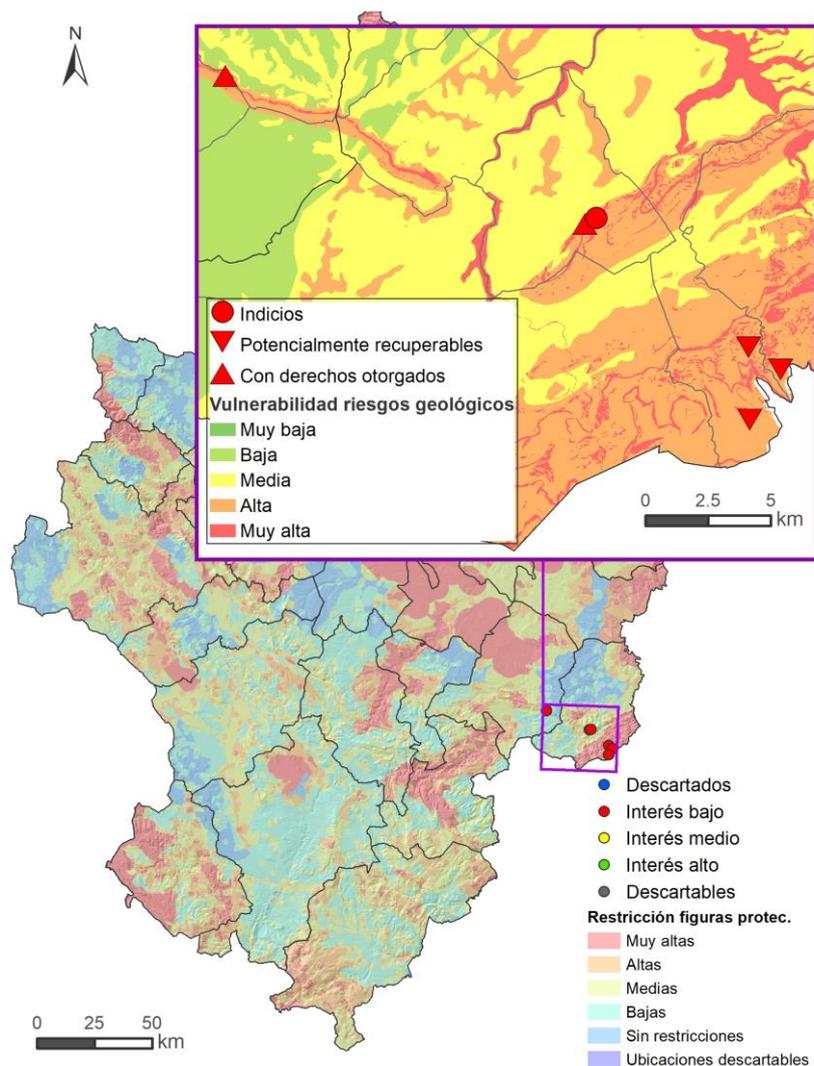


Figura 6.55. Distribución espacial de los resultados obtenidos por los registros correspondientes a la bauxita  
Elaboración propia.

### 6.3.7. Manganeso (Minerales industriales)

A pesar de no ser considerado un material crítico en el estudio efectuado por la Unión Europea, esta institución estima al manganeso como un mineral muy importante para el

funcionamiento de su industria y economía. Además, la valoración del riesgo en el suministro de este elemento se encuentra solo ligeramente por debajo del umbral establecido para definir a los elementos críticos.

En el caso concreto de Aragón, los resultados obtenidos en el análisis de interés minero por los puntos registrados en la base de datos relacionados con el manganeso muestran una distribución relativamente equitativa entre los tres grupos de interés (Figura 6.56.). La categoría de interés medio es la que agrupa un mayor número de entidades, con un 36% del total, seguida por la relativa al interés alto, con un 33% (22 registros de los 66 inventariados). Solo el 27% de los puntos incorporados a la base de datos fueron incluidos dentro de la clase de interés más baja. Por otro lado, para un punto fue descartada su explotación y otro se localiza en una ubicación vetada para las labores mineras.

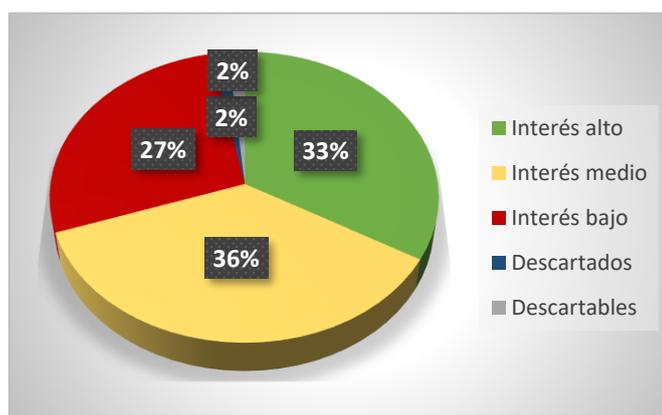


Figura 6.56. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes al manganeso. Elaboración propia.

Los resultados obtenidos por los registros incorporados a la base de datos de este registro fueron moderadamente positivos en las dimensiones *Perfil geológico* y *Aptitud del terreno*, donde solo un 1,5% y un 24%, respectivamente, de los puntos estudiados obtuvieron una calificación negativa (Figura 6.57.). El hecho de que solo un 11% de ellos se localizara en zonas con una adecuada *inserción socioeconómica* condiciona que los resultados globales no sean tan positivos.

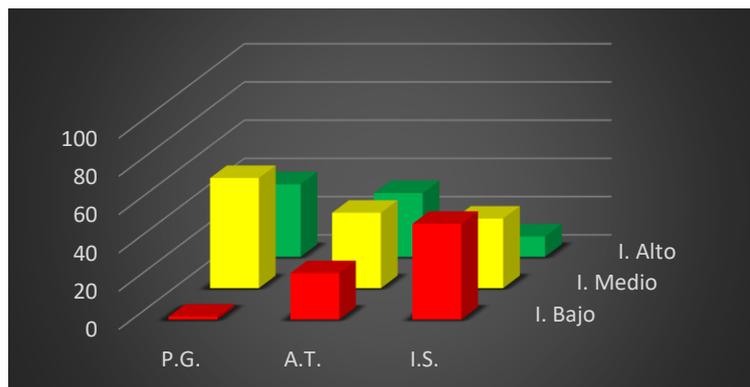


Figura 6.57. Resultados del análisis del potencial minero en cada una de las dimensiones consideradas para los registros relativos al manganeso. Elaboración propia.

Espacialmente, los registros ubicados en la provincia de Teruel muestran una calificación global muy positiva (Figura 6.58.). No en vano, 17 de los 40 puntos inventariados referentes al manganeso fueron incorporados al grupo de interés alto, mientras que 15 resultaron incluidos en el grupo de interés medio. Dentro de esta provincia existen ciertas agrupaciones puntuales de indicios o yacimientos de manganeso en ciertas zonas como la Sierra de Albarracín, la comarca de Andorra-Sierra de Arcos o el entorno de la propia capital provincial, en las que la mayoría de ellos se corresponden con una categoría de interés medio o alto. Curiosamente, dentro del término municipal de Bezas (Sierra de Albarracín), se localizan hasta nueve indicios de manganeso en menos de 6 km (Figura 6.58., zoom rosa), seis de ellos concentrados en un área menor a 1 km<sup>2</sup>. Estos seis indicios, a pesar de estar separados por poco más de 1.000 m obtuvieron unos resultados muy diferentes en el análisis de interés, incluso con una valoración similar en la dimensión *Perfil geológico*. Dos de estos indicios fueron incorporados a la categoría de interés alto, mientras que cuatro pasaron a formar parte de la de interés más bajo. Esta diferencia en los resultados finales deriva de una distinta respuesta del medio ante el drenaje ácido de minas, así como de la existencia de figuras de protección medioambientales y culturales diferentes.

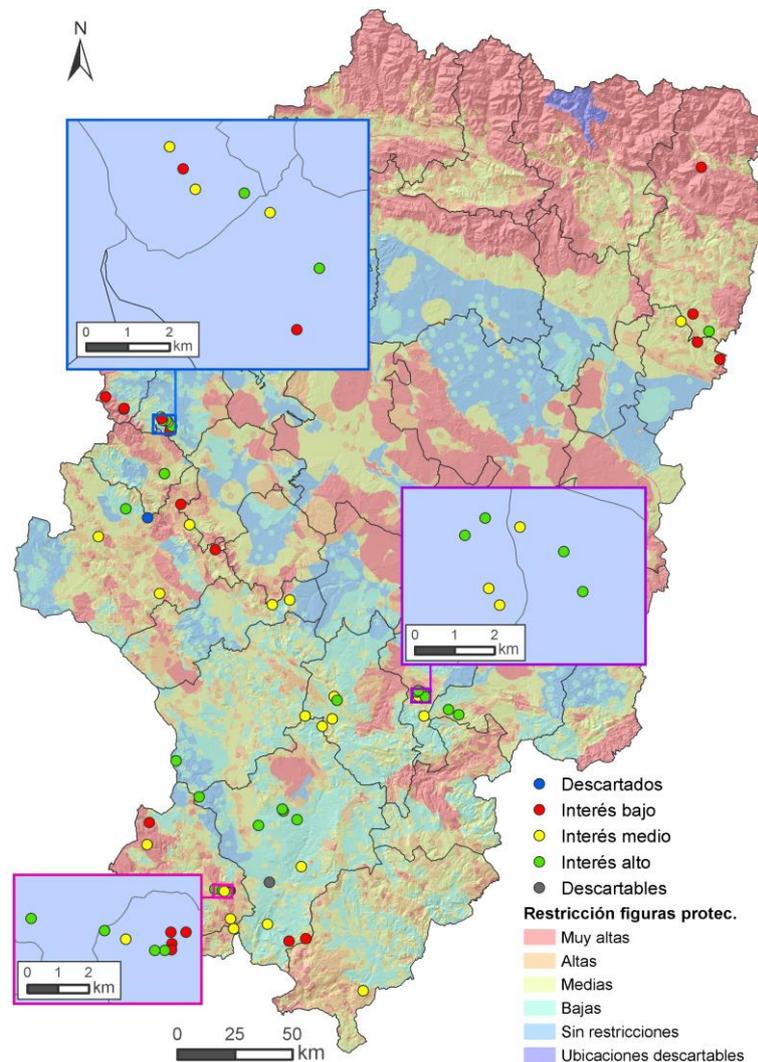


Figura 6.58. Distribución espacial de los resultados obtenidos por los registros correspondientes al manganeso. Elaboración propia.

Algo similar ocurre con los indicios de manganeso de las localidades de Tabuenca y Ambel, en la comarca del Campo de Borja (Zaragoza), (Figura 6.58., zoom azul). En este caso, las diferencias en los resultados obtenidos por una serie de elementos puntuales alineados a lo largo de poco más de 6 km radican exclusivamente en factores propios de la dimensión *Aptitud del terreno*, como la pendiente y la respuesta ante el drenaje ácido de mina, puesto que obtuvieron resultados similares en las otras dos dimensiones analizadas. En cualquier caso, y en términos generales, los resultados globales obtenidos por los registros presentes en las provincias de Zaragoza y Huesca no son tan positivos como los de los localizados en la de Teruel.

Por estado de actividad, los indicios mineros de manganeso son, con mucha diferencia sobre el resto, los que cuentan con un mayor número de registros en la base de datos generada. El elevado número de puntos incorporados a esta categoría condiciona que los resultados globales para este elemento, presentados al principio de este subapartado (Figura 6.56.), sean muy similares a los obtenidos por los indicios (Figura 6.59.). No obstante, el porcentaje de elementos de interés alto a nivel global será mayor, al ser la categoría de interés predominante entre las antiguas explotaciones de este mineral y los derechos mineros otorgados.

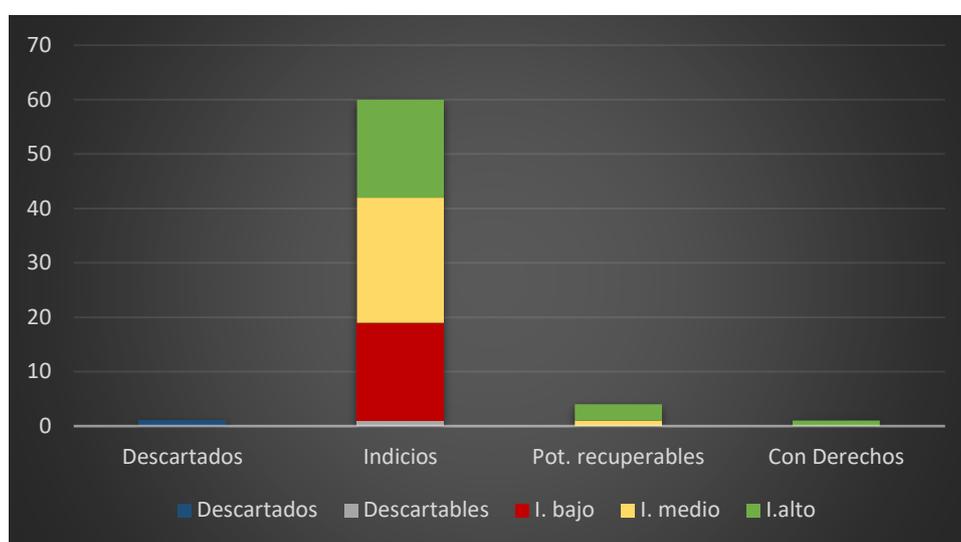


Figura 6.59. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes al manganeso agrupados por estado de actividad. Elaboración propia.

### 6.3.8. Hierro (Minerales metálicos)

El hierro, igual que el manganeso, es un elemento que la UE considera de vital importancia para su economía y el desarrollo de su industria, si bien esta organización no teme dificultades para su acopio desde fuentes externas. Por otro lado, el hierro es el recurso perteneciente al grupo de los minerales metálicos que cuenta con un mayor número de registros en la base de datos, además de ser el único, junto con los ocres, del que existen labores activas en el momento actual.

El análisis de interés minero al que fueron sometidos los registros de la base de datos referentes al hierro arroja resultados ciertamente positivos (Figura 6.60.). El 74% de los elementos analizados fueron incluidos dentro de las categorías de interés medio o alto,

suponiendo esta última clase casi el 50% del total. En el lado opuesto, 36 de los 156 puntos inventariados relativos al hierro fueron calificados como de interés bajo, para tres de ellos fue descartada su explotación y uno se localizaba en una ubicación descartable para la actividad minera.

Debido al elevado interés económico del hierro, los resultados obtenidos por los registros de la base de datos correspondientes a este recurso en la dimensión *Perfil geológico* fueron muy positivos (Figura 6.61.), puesto que casi el 70% de los mismos fue incorporado a la categoría de interés alto, y solo un 1,3% a la de interés bajo. Por otro lado, y aunque el porcentaje es muy inferior al apenas referido (37%), los recursos incorporados a la categoría de interés alto son también los más numerosos dentro de la dimensión que valora la *aptitud del terreno*. La valoración global de los registros referentes al hierro no fue tan positiva por el elevado número de elementos incorporados a la categoría de interés más bajo en la dimensión *Inserción socioeconómica*.

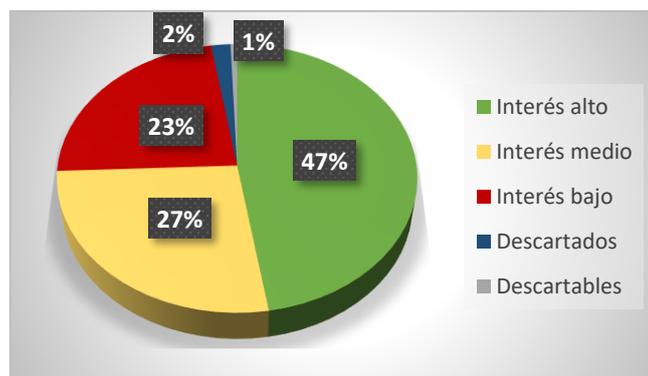


Figura 6.60. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes al hierro. Elaboración propia.

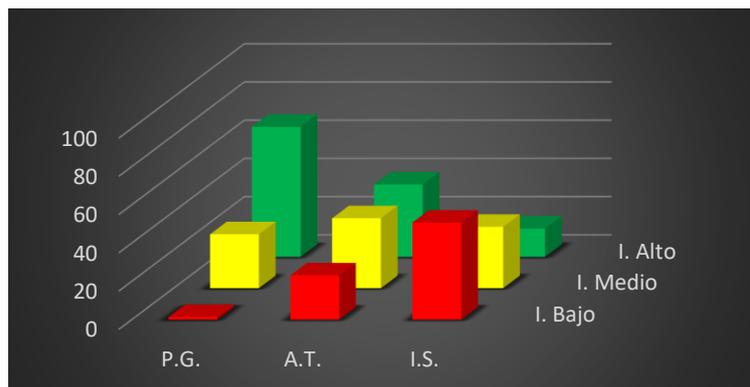


Figura 6.61. Resultados del análisis del potencial minero en cada una de las dimensiones consideradas para los registros relativos al hierro. Elaboración propia.

Los registros de hierro inventariados en la Comunidad Autónoma de Aragón se distribuyen, principalmente, por las dos grandes áreas montañosas de la región (Figura 6.62.). Como se analizó en el Capítulo III de la tesis, la distribución de los puntos relativos a minerales metálicos muestra una alineación que coincide con la orientación preferente de los sistemas montañosos en los que se localizan. Esta distribución es claramente observable en el caso del hierro, con dos alineaciones NO-SE coincidentes con los dos ramales de la Cordillera Ibérica y una concentración de puntos menos poblada con orientación E-O en los Pirineos.

Los resultados obtenidos en el análisis de interés minero son muy diferentes en función de la localización de los registros estudiados. Los puntos ubicados en la Cordillera Ibérica han obtenido unos resultados globales más positivos que los inventariados en los Pirineos. Especialmente buenos son los resultados en la rama castellana del Sistema Ibérico en territorio turolense, en áreas como la Sierra de Albarracín y en yacimientos tan importantes como el de Sierra Menera, en Ojos Negros. En el tramo aragonés de este sistema montañoso dominan los elementos calificados como de interés medio y alto, si bien estos últimos son, en proporción, menos frecuentes que en el área previamente analizada.

Por el contrario, ninguno de los puntos inventariados en el Pirineo Axial, correspondientes con indicios y antiguas labores extractivas, ha sido calificado como de interés alto. Los bajos valores que muestra este territorio en las dimensiones *Aptitud del terreno* e *Inserción socioeconómica* (que pueden ser observados en los diversos mapas adjuntos en el Anexo I), según los criterios empleados en el análisis propuesto en esta tesis

para los minerales metálicos, condicionan que los puntos localizados en ellos no adquieran una calificación más favorable.

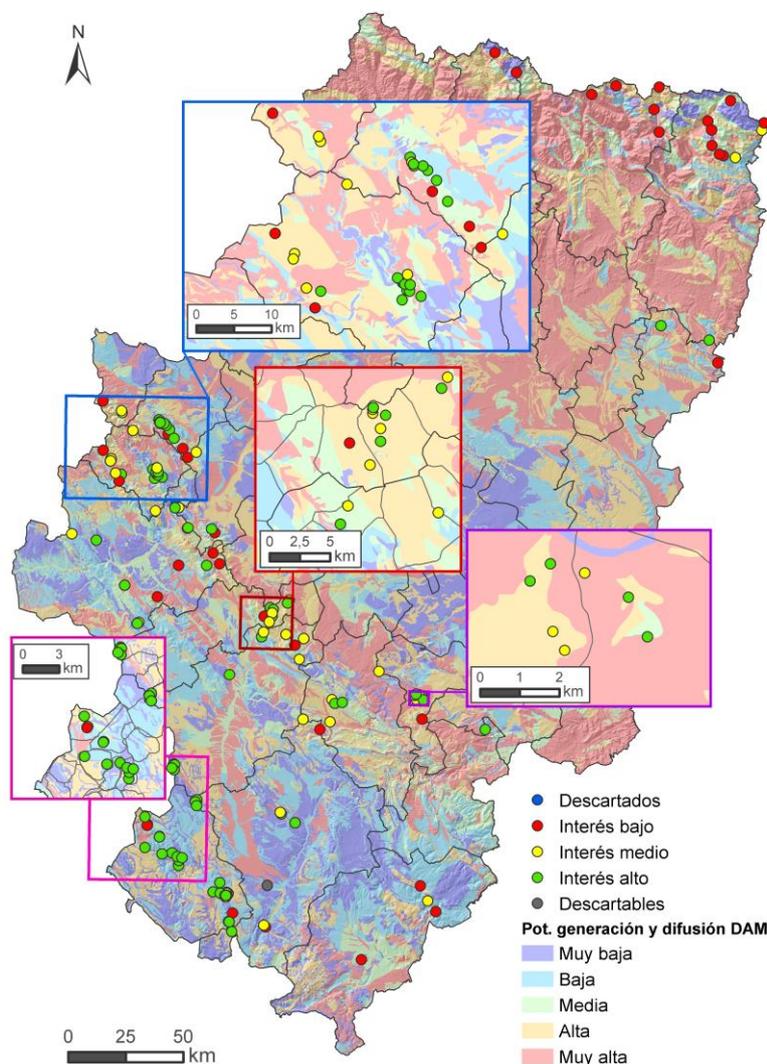


Figura 6.62. Distribución espacial de los resultados obtenidos por los registros correspondientes al hierro. Elaboración propia.

Los indicios son la categoría que cuenta con un mayor número de registros en el territorio aragonés. Más del 40% de estos elementos fue incluido en la categoría de interés alto, mientras que un 31% obtuvo la calificación de interés medio y solo un 25% fue incorporado a la categoría de interés bajo (Figura 6.63.). Este último porcentaje es similar en el grupo correspondiente a los potencialmente recuperables. Por otro lado, en este estado de actividad los calificados como de interés alto ascienden hasta el 55%. Todos los puntos recogidos en la base de datos relativos a derechos mineros otorgados fueron incluidos en la

categoría de interés alto, mientras que de las tres labores que se encuentran activas actualmente, dos pertenecen a la categoría de interés medio y una a la de alto.

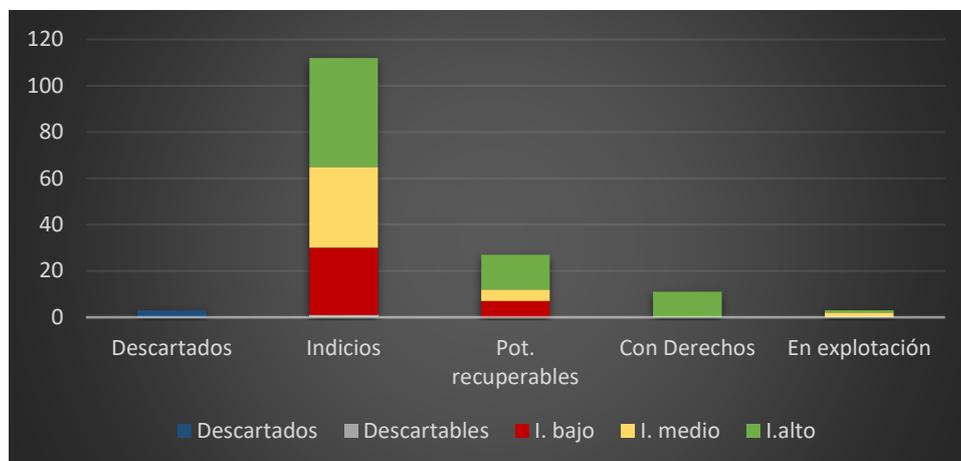


Figura 6.63. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes al hierro agrupados por estado de actividad. Elaboración propia.

### 6.3.9. Carbón (Recursos energéticos)

Como se comentó en el capítulo III de la tesis, Aragón es una región en la que la minería del carbón cuenta con una amplia tradición, especialmente en la cuenca de Mequinenza y en las localizadas en la provincia de Teruel. No en vano, el carbón es, tras las gravas, el recurso que cuenta con un mayor número de registros en la base de datos generada.

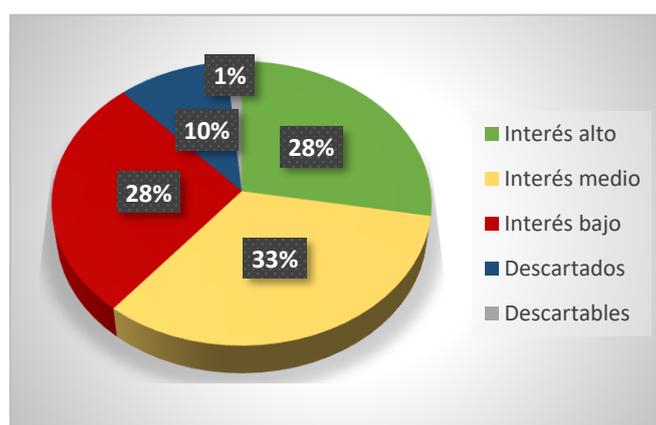


Figura 6.64. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes al carbón. Elaboración propia.

La clase de interés medio es la que congrega un mayor número de registros en los resultados del análisis efectuado (Figura 6.64.), con un 33% del total. Las categorías correspondientes al interés alto y al interés bajo incorporan un número similar de puntos, mientras que para 71 de los casi 700 registros incorporados a la base de datos fue descartada su explotación.

Un porcentaje importante (17,3%) de los registros correspondientes al carbón que fueron asignados a la categoría de potencial minero más numerosa, la correspondiente al interés medio, lo hizo por presentar la siguiente combinación en los resultados dimensionales: un interés medio en la dimensión conocida como *Perfil geológico*, un interés bajo en la *aptitud del terreno* y un interés alto en la *inserción socioeconómica*. Estas tres categorías de interés son, además, las más numerosas en sus respectiva dimensiones (Figura 6.65.).

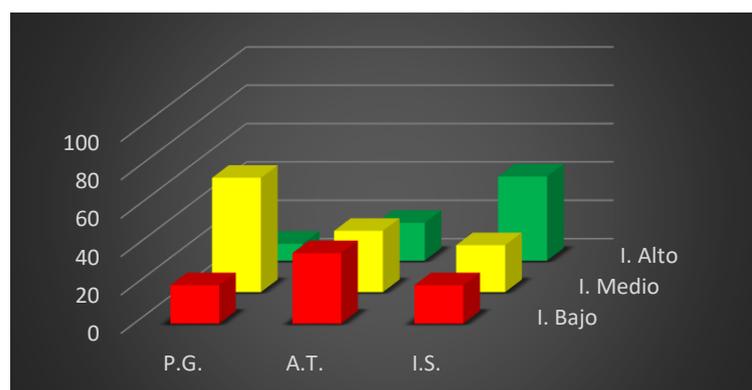
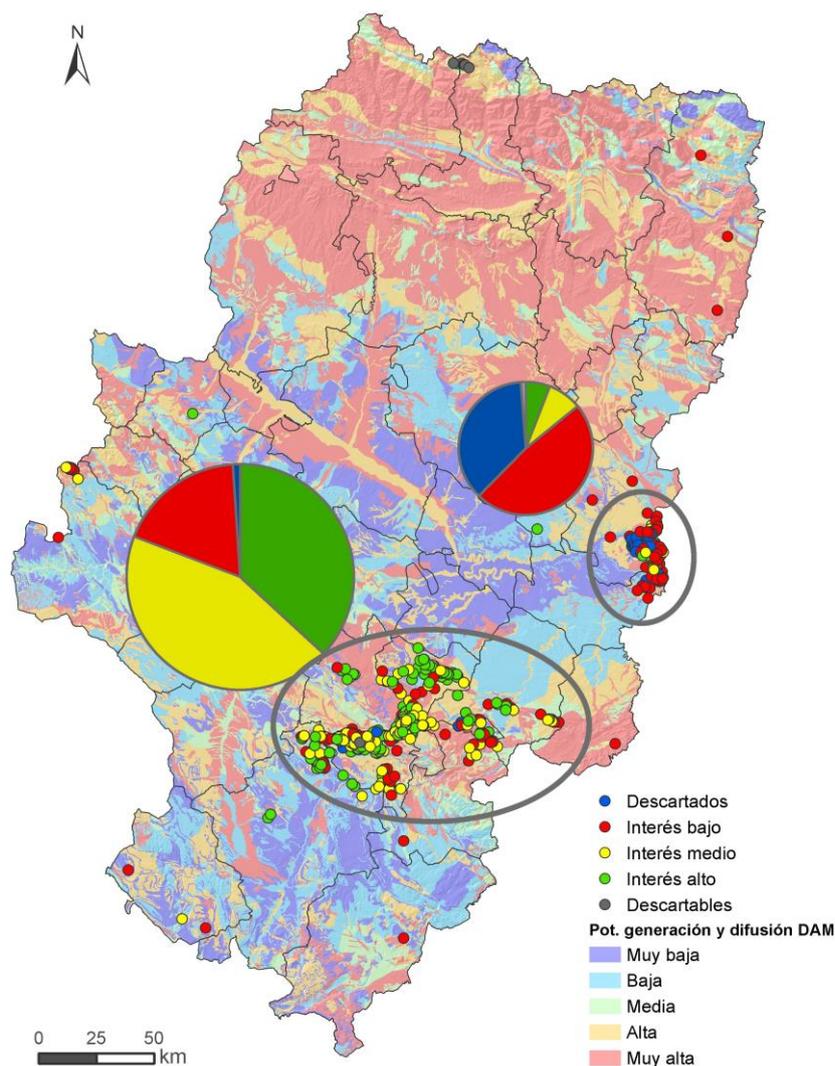


Figura 6.65. Resultados del análisis del potencial minero en cada una de las dimensiones consideradas para los registros relativos al carbón. Elaboración propia.



*Figura 6.66. Distribución y valoración de los elementos registrados en la base de datos referentes al carbón. Porcentaje de elementos clasificados por interés en cada cuenca carbonífera, donde el tamaño de los gráficos es proporcional al número de elementos inventariados. Elaboración propia.*

La agrupación de numerosos puntos del inventario referentes a minas, yacimientos e indicios de carbón en dos áreas muy localizadas del territorio, demuestra la existencia de dos grandes cuencas carboníferas en el territorio aragonés (Figura 6.66.). Una de ellas, la más extensa y la que cuenta, además, con un mayor número de elementos inventariados, se localiza en la provincia de Teruel, entre las comarcas de las Cuencas Mineras, Andorra-Sierra de Arcos y el Bajo Aragón. La otra, que recibe el nombre de Cuenca Minera de Mequinenza, se halla repartida entre las provincias de Zaragoza y Huesca, dentro de la Comunidad Autónoma de Aragón, y las de Lleida y Tarragona, en Cataluña.

El análisis de la potencialidad de los elementos localizados en cada una de las dos cuencas mineras individualizadas arroja resultados muy diferentes. Mientras que en la cuenca minera turolense el 37% de los puntos analizados ha obtenido una valoración positiva, este porcentaje se reduce hasta el 5% en la de Mequinenza. En esta última cuenca dominan los puntos descartados (37%) y los clasificados como de interés bajo (47%). Por el contrario, en la cuenca minera turolense, solo el 17% de los elementos analizados han sido englobados dentro de la categoría de interés minero bajo.

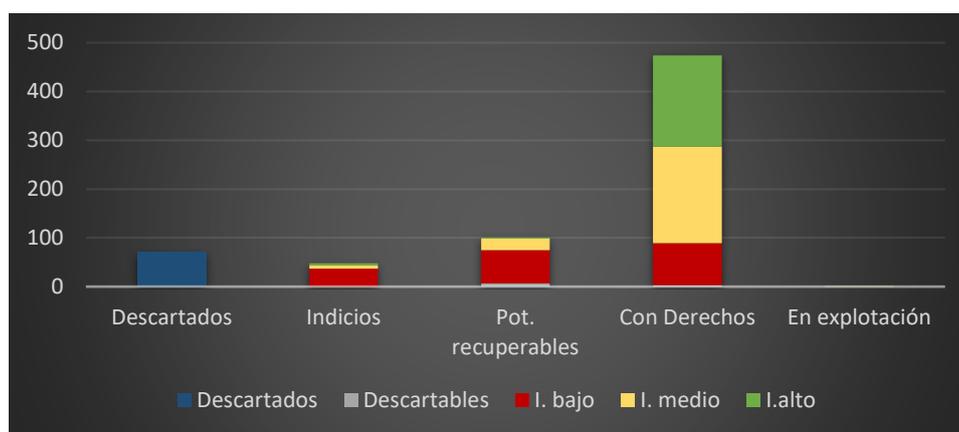


Figura 6.67. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes al carbón agrupados por estado de actividad. Elaboración propia.

En conjunto, los derechos mineros otorgados en la actualidad, con 474 puntos inventariados, conforman la categoría que congrega un mayor número de registros en la base de datos (Figura 6.67.). En dicha categoría dominan los elementos incorporados a los grupos de interés medio (41%) y alto (39%). Estos dos grupos son, por el contrario, minoritarios entre los indicios y las antiguas labores extractivas, y mucho más escasos que los catalogados como de interés bajo. Finalmente, el único yacimiento en explotación en el momento actual fue catalogado dentro del grupo de interés medio.

### 6.3.10. Uranio (Recursos energéticos)

Diversas fuentes consultadas en la elaboración de la base de datos mencionan la presencia de indicios de este mineral radiactivo en diferentes zonas de la región aragonesa, siendo los más relevantes los ligados a los lignitos de la cuenca de Mequinenza (*La Minería de Aragón*, 1994). Sometidos al análisis de interés minero propuesto en esta tesis, los indicios de uranio inventariados en el territorio aragonés arrojan unos resultados muy

pobres (Figura 6.68.). El 92% de ellos obtuvieron valores que implican su incorporación a la categoría de interés más bajo y solo uno de ellos fue calificado como de interés alto.

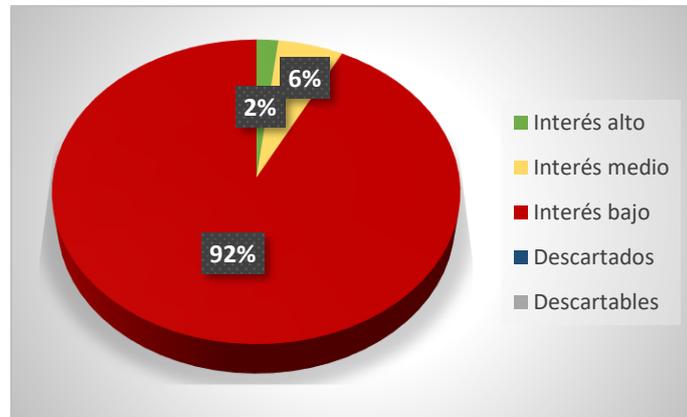


Figura 6.68. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes al uranio. Elaboración propia.

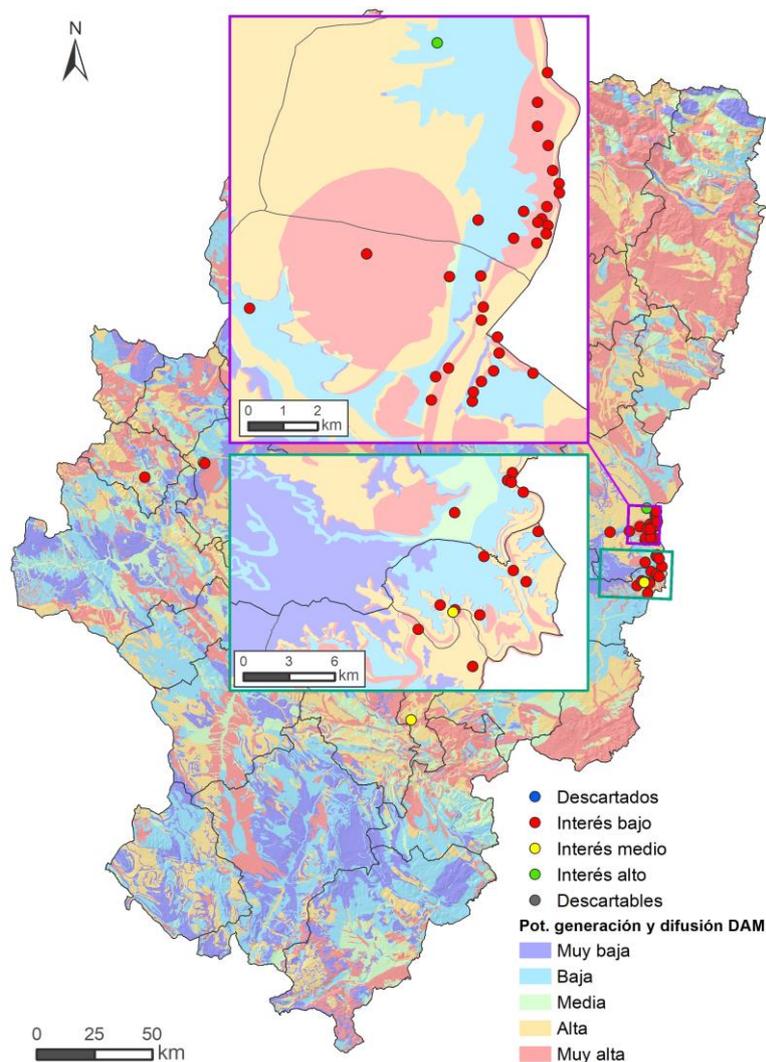


Figura 6.69. Distribución espacial de los resultados obtenidos por los registros correspondientes al uranio. Elaboración propia.

Todos los indicios relacionados con el uranio obtuvieron una calificación muy baja en el *Perfil geológico* (Figura 6.70.), por lo que su valoración final dependerá de las otras dos dimensiones consideradas, relacionadas con el territorio y lo que sobre él se localiza. En cualquier caso, solo 4 de los 53 elementos registrados fueron incluidos dentro de la categoría de interés final medio o alto: dos en la cuenca lignífera de Mequinenza, uno en la comarca de Valdejalón (Zaragoza) y otro en la provincia de Teruel (Figura 6.69.).

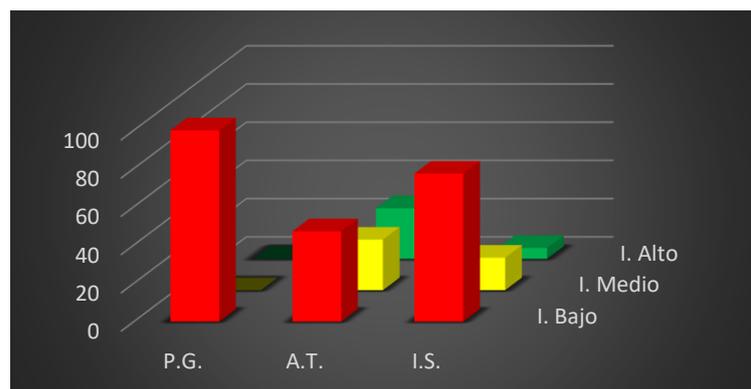


Figura 6.70. Resultados del análisis del potencial minero en cada una de las dimensiones consideradas para los registros relativos al uranio. Elaboración propia.

### 6.3.11. Hidrocarburos no convencionales

A pesar de formar parte el grupo de los recursos energéticos en la forma de indicios, por su importancia y por haber sido evaluados de un modo diverso se ha considerado interesante presentar los resultados obtenidos en el análisis por este grupo de una forma independiente. Cabe recordar que, si bien las dimensiones *Aptitud del terreno* e *Inserción socioeconómica* fueron analizadas con los mismos indicadores que el resto de elementos pertenecientes al grupo de los recursos energéticos, el valor tomado en la dimensión correspondiente al *perfil geológico* procederá de los resultados obtenidos en el análisis del TOC (*Total organic carbon*), aspecto que cuantifica el contenido en carbono orgánico de la muestra.

Como se analizó en el apartado IV de la tesis, los expertos establecen categorías de calidad de la roca generadora en función del porcentaje en carbono contenido. De este modo, distinguen entre formaciones muy buenas generadoras de hidrocarburos, buenas, regulares, pobres y no generadoras.

Exceptuando las muestras enviadas a analizar procedentes de la Formación Margas de Frías, tomadas en las localidades de Moscardón y Frías de Albarracín, así como uno de los niveles, también margosos, pertenecientes a la Fm. Sot de Chera (muestreada en Gea de Albarracín), cuyo porcentaje de carbono orgánico las hace ser clasificadas dentro de la categoría de “*buenas*”, el resto de las muestras presentan resultados poco prometedores. Por otro lado, la muestra tomada en Aliaga perteneciente a la Fm. Escucha, presenta un

contenido en carbono excepcionalmente alto (13,11%). Sin embargo, cabe recordar que se trata de una roca carbonosa, que no entra dentro de ninguna de las dos clasificaciones propuestas dentro de la catalogación aportada en el cuarto apartado de la tesis, y que se refresca en la Tabla 6.1. No obstante, el alto contenido en materia orgánica, así como la posibilidad de extraer el metano retenido en la estructura microporosa de los carbones mediante su perforación con métodos no convencionales, han hecho que esta muestra sea asignada a la categoría más alta.

Tabla 6.1. Criterios de evaluación de las rocas generadoras. Basado en la clasificación propuesta por McCarthy (Boyer et al., 2011).

Calidad de roca generadora	TOC en shales (%)	TOC en rocas carbonatadas (%)
No generadora	0 a 0,5	0 a 0,2
Pobre	0,5 a 1	0,2 a 0,5
Regular	1 a 2	0,5 a 1
Buena	2 a 5	1 a 2
Muy buena	> 5	> 2

En el mapa representado en la Figura 6.71. se muestra la distribución espacial de los resultados del análisis del TOC obtenidos por las muestras analizadas, empleando la clasificación propuesta en la tabla superior.

Si a los resultados del análisis del TOC, que determinan el valor del *Perfil geológico*, se le añaden los de las otras dos dimensiones consideradas, *Aptitud del terreno* e *Inserción socioeconómica*, se obtendrá como resultado el valor de interés final. Es necesario apuntar que, a diferencia de los puntos inventariados referentes al resto de recursos, las formaciones geológicas analizadas se extienden lateralmente por amplias zonas del territorio. Muy probablemente, el lugar óptimo para una potencial explotación de los hidrocarburos que podrían albergar estas formaciones geológicas no se corresponderá con la ubicación donde se ha realizado el muestreo. Sin embargo, y ante la imposibilidad de conocer esta posición óptima (que dependerá de numerosos factores y requerirá de un profundo conocimiento de las características del nivel rocoso susceptible de ser hidrofracturado), se ha optado por realizar los análisis referentes a la *inserción socioeconómica* y a la *aptitud del terreno* a partir de la ubicación donde se realizó la toma de muestras, a modo de aproximación.

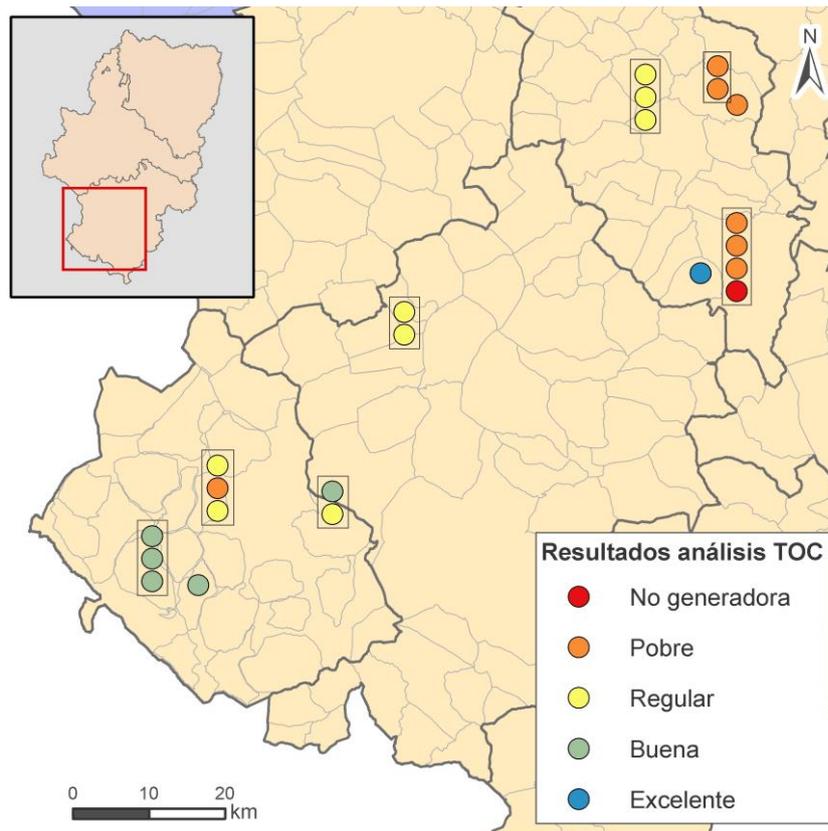


Figura 6.71. Resultados del análisis TOC simbolizados en función de la clasificación de McCarthy (2011). Los puntos agrupados dentro de una caja proceden del mismo afloramiento, pero pertenecen a distintos niveles de la formación rocosa. En estos casos, la ubicación espacial concreta del yacimiento coincide con la del punto inferior, que se corresponde, a su vez, con el nivel situado más cerca de la base en la formación geológica. Elaboración propia.

Casi la mitad (10) de los 22 niveles rocosos analizados, procedentes de 10 formaciones geológicas diferentes fueron calificados como de interés bajo (Figura 6.72.). Siete de las muestras obtuvieron unos resultados positivos, mientras que dentro de la categoría de interés medio fueron agrupadas tan solo 5.

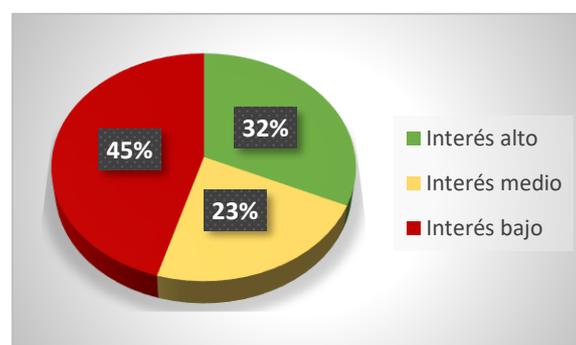


Figura 6.72. Resultados del análisis para el grupo configurado por los hidrocarburos no convencionales.

La distribución de las categorías anteriormente señaladas no sigue un patrón claro en el territorio (Figura 6.73.), puesto que pueden ser encontrados puntos con una clasificación alta, media o baja tanto en la zona de la Sierra de Albarracín como en la comarca de las Cuencas Mineras. Las muestras de la Fm. Turmiel tomadas en Sierra Palomera, situada entre las dos áreas antes mencionadas, presentan resultados correspondientes a niveles de interés medio y bajo.

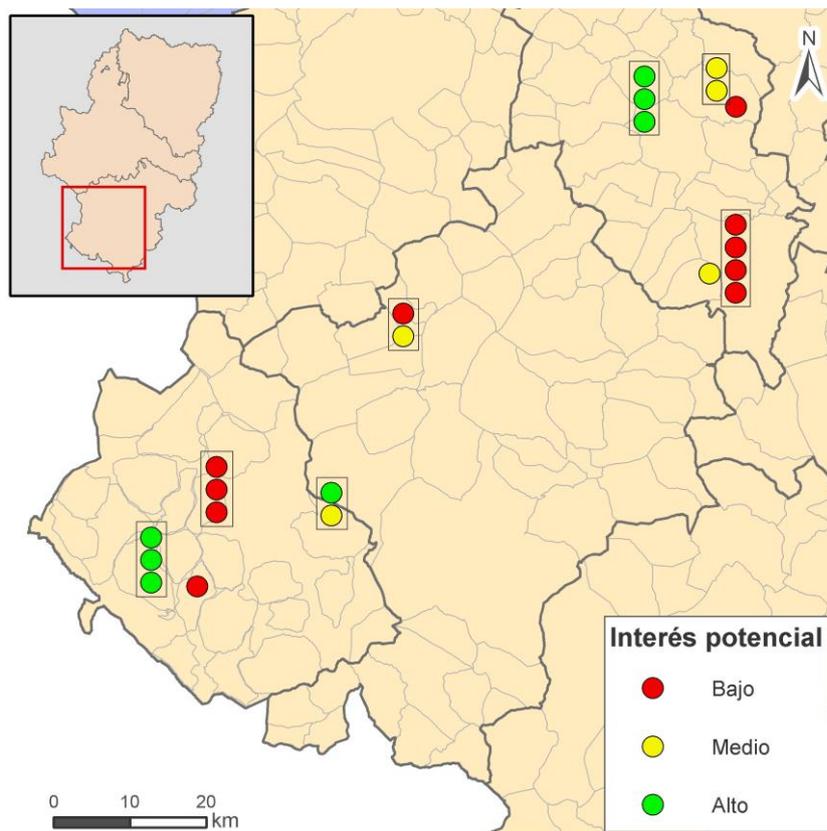


Figura 6.73. Resultados finales del análisis de los indicios correspondientes a rocas madre generadoras de hidrocarburos. Elaboración propia.

Dentro de las dos áreas de las que proceden la mayor parte de las muestras también se observan notables diferencias en los resultados obtenidos. Las margas tomadas en Frías de Albarracín y las pizarras negras muestreadas entre los términos municipales de La Hoz de la Vieja y Montalbán han sido las que han arrojado resultados más prometedores. A pesar de que estas últimas no presentaban unos valores de TOC muy altos, los buenos resultados logrados en las otras dos dimensiones aumentaron su valoración final.

Las muestras procedentes de las pizarras silúricas de Torres de Albarracín y de la Fm. Forcall en Aliaga (estás últimas ya mostraban unos valores de TOC muy bajos) obtuvieron resultados negativos en el análisis de interés final en todos los niveles estudiados. Curiosamente, también recibieron una calificación mínima las Margas de Frías procedentes de la localidad de Moscardón, cuyo afloramiento se sitúa a menos de 6 km del de la misma formación geológica en el municipio vecino de Frías de Albarracín y que, como se ha visto en párrafos anteriores, fueron calificadas como de interés alto. El mayor valor paisajístico del entorno de Moscardón y la existencia de numerosas figuras de protección no presentes en el de Frías de Albarracín condicionan estos resultados tan dispares.

Llegados a este punto, cabe recordar que al tratarse de indicios, el hecho de que hayan obtenido una calificación alta en el análisis del potencial no implica un interés real en su explotación, sino en la prosecución de los estudios de exploración. Por el contrario, si el resultado del análisis es negativo, especialmente en los casos en los que el valor de carbono orgánico contenido en la muestra es muy bajo, sí que podría descartarse el interés de una determinada formación geológica como roca madre generadora de hidrocarburos.

También es importante subrayar que el contenido en TOC no es un valor decisivo para la definición de una roca como generadora de hidrocarburos, ya que este indica la cantidad de materia orgánica presente en la roca, pero no la calidad de la misma. Si una roca muestra unos valores de TOC prometedores, deberá ser sometida a nuevos análisis para determinar la calidad y la madurez de la materia orgánica en ella contenida (Boyer et al., 2011). Entre ellos se incluye el análisis que determina la cantidad de hidrocarburos contenidos en la roca mediante un proceso de pirolisis, o el que establece el tipo de kerógeno que alberga la roca en función de sus parámetros químicos. El tipo de kerógeno está relacionado con el origen de la materia orgánica (Hilyard, 2012) y determina el tipo de hidrocarburo generado.

Además, se deberán tener en cuenta otros parámetros de la roca analizada, como su historia geológica, que determinará si la materia orgánica ha alcanzado unos valores de temperatura y presión suficientes como para que los hidrocarburos hayan sido generados a partir de la materia orgánica contenida en la roca, la potencia y la extensión lateral de la formación geológica, que condiciona el volumen de la misma, y las variaciones laterales en

los valores de materia orgánica contenida a lo largo de la formación, entre otros factores geológicos.

Además, como se analizó en el segundo capítulo de la tesis, la técnica de extracción de hidrocarburos conocida como fractura hidráulica ha sido ampliamente criticada por su potencial para contaminar acuíferos o para activar fallas generadoras de pequeños movimientos sísmicos. Será, por tanto, esencial conocer la posición de los acuíferos con respecto de las formaciones potencialmente explotables para determinar el riesgo de alteración de las masas de agua subterráneas, así como la localización espacial de las fallas activas en el entorno de la ubicación donde se colocarían los pozos de explotación.

Una vez expuestos los resultados obtenidos por algunas formaciones geológicas aflorantes en la región en su estudio como potenciales rocas madre generadoras de hidrocarburos, en los próximos subapartados serán presentadas, de forma sistemática, las valoraciones logradas por los recursos considerados como críticos por la Unión Europea.

#### 6.3.12. Antimonio (Elementos críticos: minerales metálicos)

El análisis que valora el interés minero de los elementos inventariados arroja unos resultados muy positivos en el caso del antimonio (Figura 6.74.). 11 de los 13 elementos inventariados, lo que supone 85% del total, han sido asignados al grupo de interés alto, mientras que el resto han recibido una catalogación de interés medio.

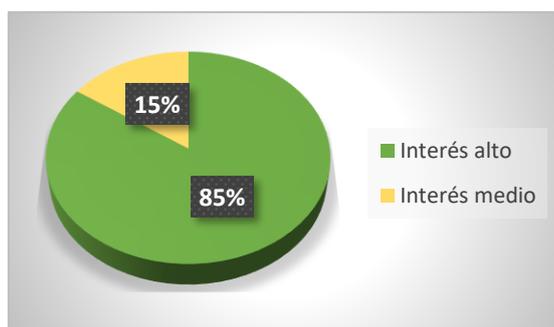


Figura 6.74. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes al antimonio. Elaboración propia.

Estos buenos resultados se derivan, principalmente, de las puntuaciones obtenidas en las dimensiones *Perfil geológico* y *Aptitud del territorio*, donde todos los elementos registrados

fueron clasificados como de interés medio o alto (Figura 6.75.). Por el contrario, ninguno de estos registros logró una puntuación suficiente como para entrar en la categoría de interés alto en la dimensión *Inserción socioeconómica*.

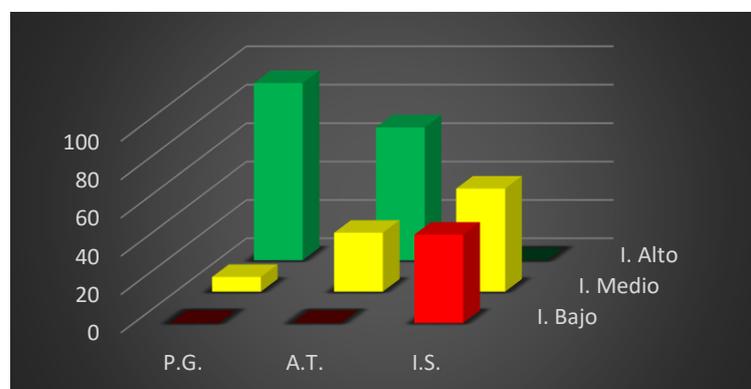


Figura 6.75. Resultados del análisis del potencial minero en cada una de las dimensiones consideradas para los registros relativos al antimonio. Elaboración propia.

En el mapa mostrado en la Figura 6.76. se representa la distribución espacial de los resultados obtenidos en el análisis por los registros de antimonio presentes en la base de datos. Los catalogados con un interés minero alto aparecen agrupados en el Sistema Ibérico, entre las comarcas de la Comunidad de Calatayud y las Cuencas Mineras. Los dos únicos elementos no pertenecientes a esta categoría se encuentran separados por una distancia considerable, uno en el propio entorno de Calatayud y el otro en la Sierra de Albarracín. Resulta curioso observar como el indicio catalogado como de interés medio en el entorno de Calatayud, concretamente en el límite entre los municipios de Ateca y Moros, se encuentra localizado a menos de 2 km de otro que ha recibido la calificación más alta, habiendo recibido en todos los indicadores una valoración similar menos en el relativo a los riesgos naturales. El hecho de que el de interés medio se localice en la llanura de inundación del río Manubles demuestra la relevancia otorgada a este factor.

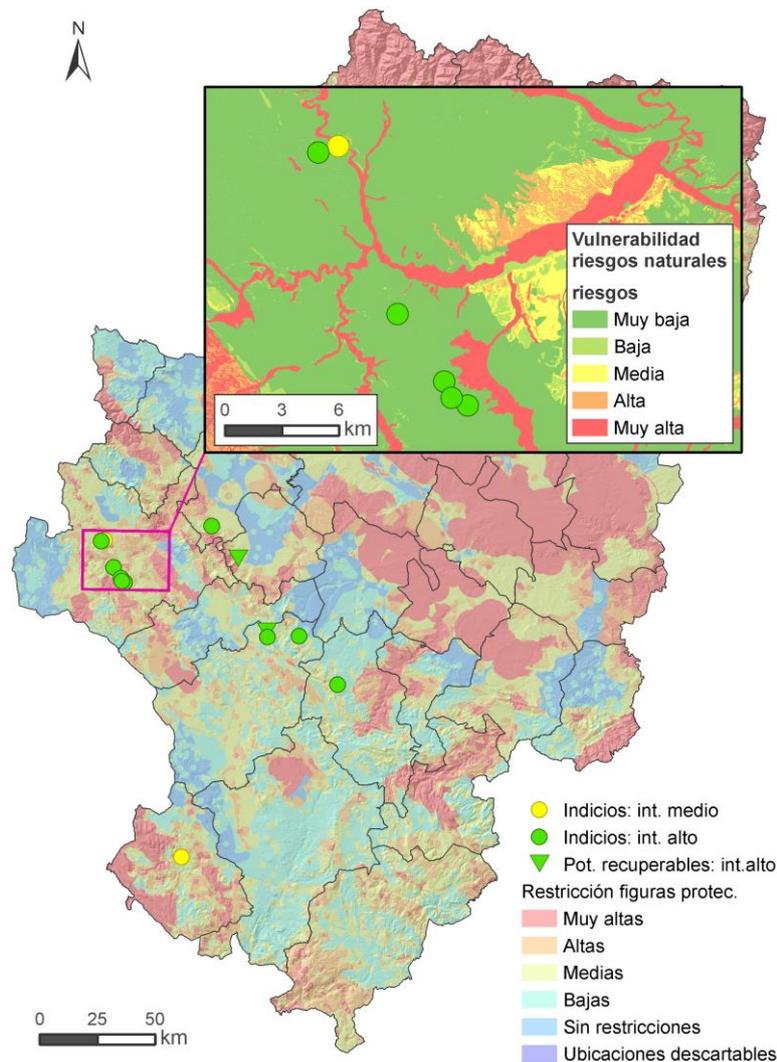


Figura 6.76. Distribución espacial de los registros de antimonio en la base de datos. Elaboración propia.

### 6.3.13. Barita (Elementos críticos: minerales metálicos)

Los resultados del análisis de interés para los puntos inventariados referentes a la barita (Figura 6.77.) muestran unos valores menos positivos que los obtenidos por el antimonio. No obstante, una amplia mayoría de los indicios y antiguas explotaciones analizados han obtenido como resultado un interés alto. Por otra parte, 18 de los 38 elementos analizados han sido catalogados como de interés medio, lo que supone un 27% del total. 11 puntos del inventario corresponden a la categoría de interés bajo, mientras que para uno de los registros que componen este grupo fue descartada su explotación.

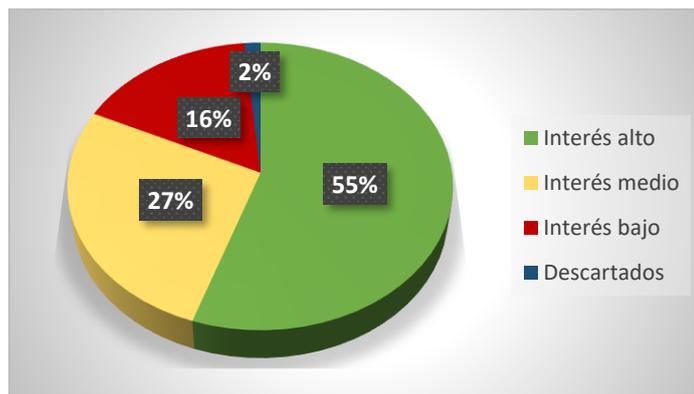


Figura 6.77. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes a la barita. Elaboración propia.

Un porcentaje importante (22,5%) de los registros analizados referentes a este recurso obtuvieron una calificación del potencial minero alta por la combinación de una valoración positiva de las dimensiones *Aptitud del terreno* y *Perfil geológico* y una pobre *inserción socioeconómica*. No en vano, estas categorías de interés son las predominantes en las respectivas dimensiones consideradas en el análisis (Figura 6.78.).

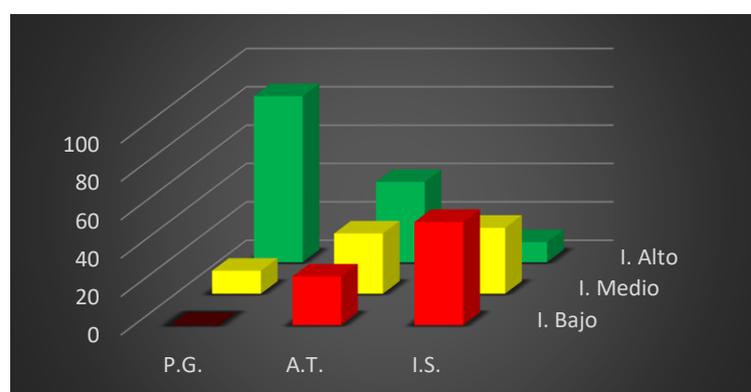


Figura 6.78. Resultados del análisis del potencial minero en cada una de las dimensiones consideradas para los registros relativos a la barita. Elaboración propia.

Los registros de barita localizados en la Sierra de Albarracín (Figura 6.79.) son los que han recibido, en su conjunto, una calificación más positiva. 12 de los 15 puntos registrados en esta área fueron englobados en el grupo de interés más alto, mientras que los tres restantes pertenecen a la categoría de interés medio. El resto de elementos localizados en la Cordillera Ibérica, tanto en la provincia de Zaragoza, como en la de Teruel, muestran una calificación de interés final más variable, si bien casi la mitad de ellos han sido categorizados como de interés alto. El único indicio ubicado en el Pirineo presenta un interés bajo según el análisis

efectuado, tras haber recibido una puntuación baja en la *inserción socioeconómica* y media en las otras dos dimensiones.

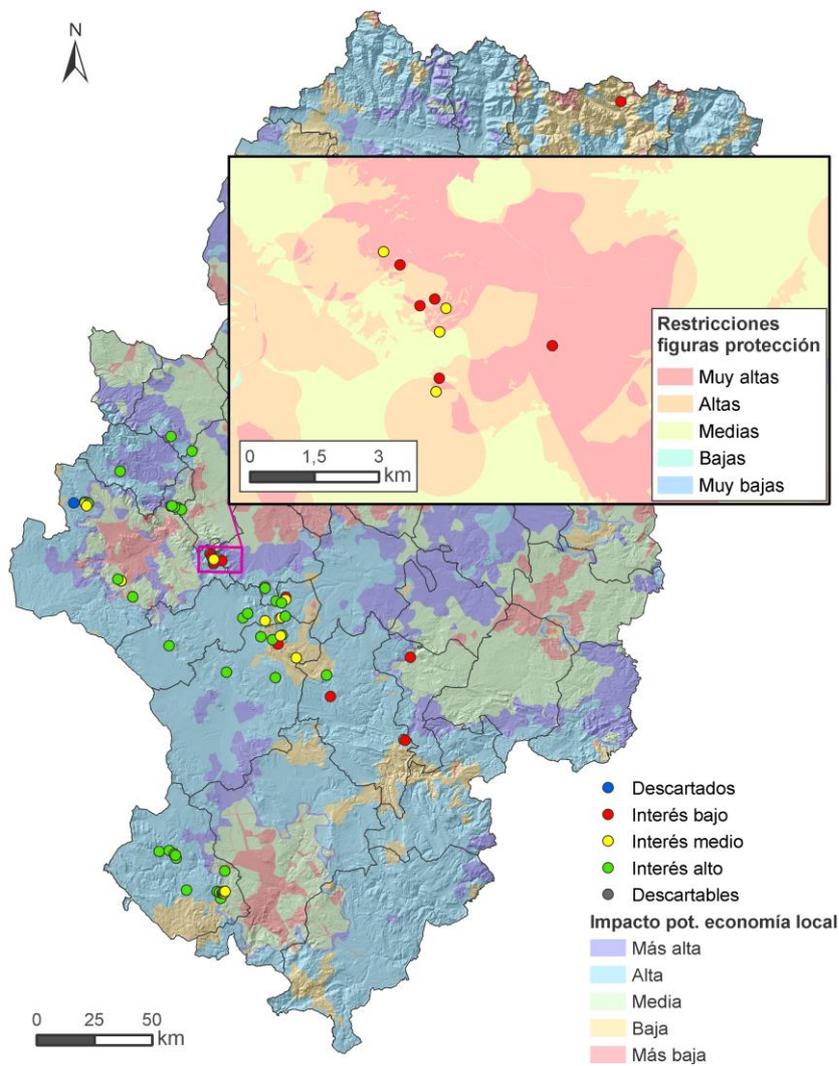


Figura 6.79. Distribución espacial de los registros de barita en la base de datos. Elaboración propia.

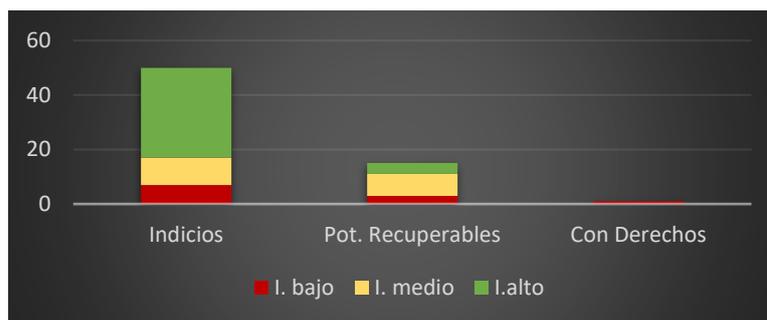


Figura 6.80. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes a la barita agrupados por estado de actividad. Elaboración propia.

Por estado de actividad, los indicios han recibido una valoración claramente más favorable que la obtenida por las labores mineras ya abandonadas (Figura 6.80.). Mientras que casi un 70% de los indicios fueron clasificados dentro del grupo de interés alto, este porcentaje se reducía en la categoría de los potencialmente recuperables a menos de un 30%. El Derecho Minero Salomón, localizado en la localidad de La Zoma (Cuenca Mineras), a pesar de haber obtenido una valoración muy alta en la dimensión geológica, presenta un valor de interés bajo en las otras dos, lo que condiciona su inclusión en el grupo de interés final bajo.

#### 6.3.14. Cobalto (Elementos críticos: minerales metálicos)

De los cuatro elementos inventariados en la sección de la base de datos correspondientes al cobalto, solo uno ha obtenido una valoración de interés alto, mientras que el resto han sido agrupados dentro de la categoría de interés bajo (Figura 6.82.).

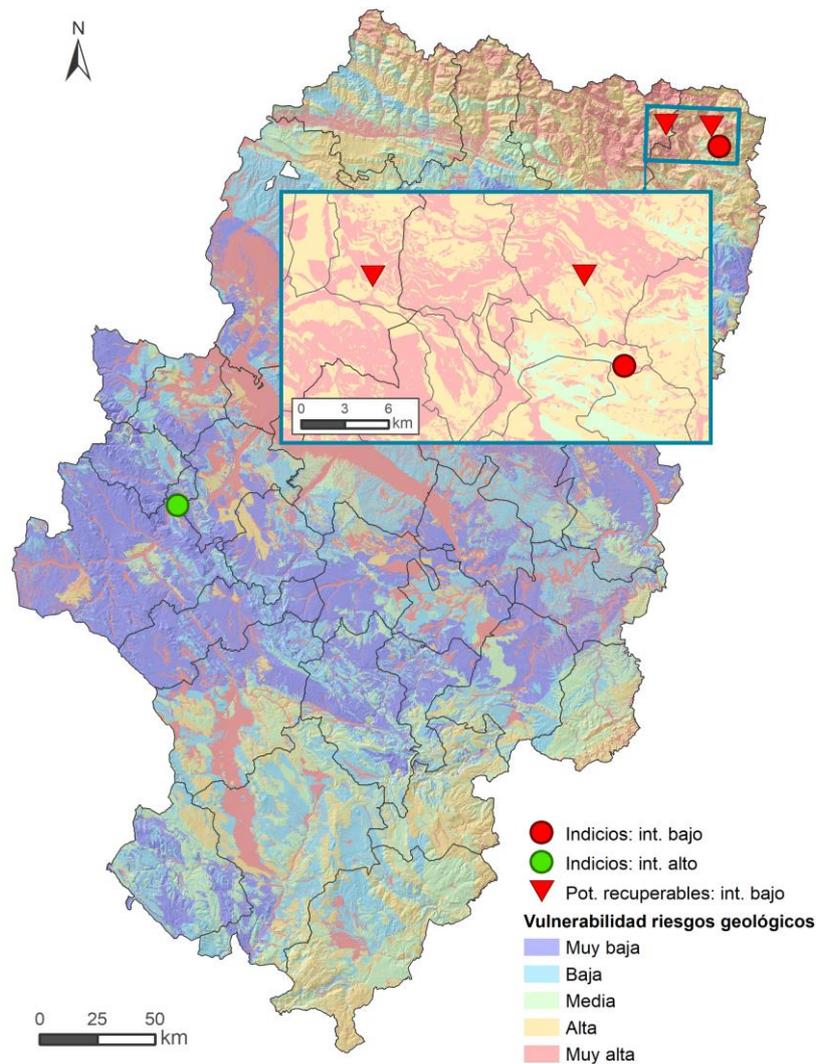


Figura 6.81. Distribución espacial de los registros de cobalto en la base de datos. Elaboración propia.

En lo que respecta a la distribución espacial de los resultados obtenidos por este recurso (Figura 6.81), los tres registros relativos al cobalto situados en el área oriental de los Pirineos obtuvieron resultados negativos en el análisis de interés minero, derivados de una deficiente *inserción socioeconómica* y una *aptitud del terreno* pobre.

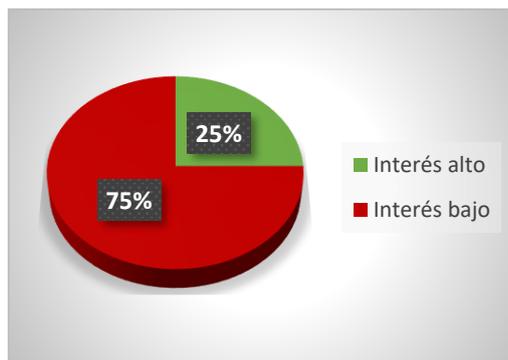


Figura 6.82. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes al cobalto. Elaboración propia.

Por el contrario, el único indicio localizado en la Cordillera Ibérica, situado en el límite entre los municipios de Chodes y Morés (provincia de Zaragoza), fue englobado en la categoría de interés alto, al combinar un resultado positivo en las dimensiones *Perfil geológico* y *Aptitud del terreno* y un interés medio en la denominada *Inserción socioeconómica*.

#### 6.3.15. Espato flúor (Elementos críticos: minerales industriales)

Casi la mitad de los elementos analizados referentes al espato flúor han sido calificados dentro de la categoría de interés medio (Figura 6.83.). En el resto de las categorías, más de un 25% de los puntos analizados fueron incorporados a la de interés alto, mientras que un 23% pertenecerá a la de interés más bajo. En los Pirineos, la antigua mina de Sallent de Gállego, al estar ubicada dentro de los dominios de la pista de esquí de Formigal, ha pasado a formar parte del grupo de las descartables por su localización espacial.

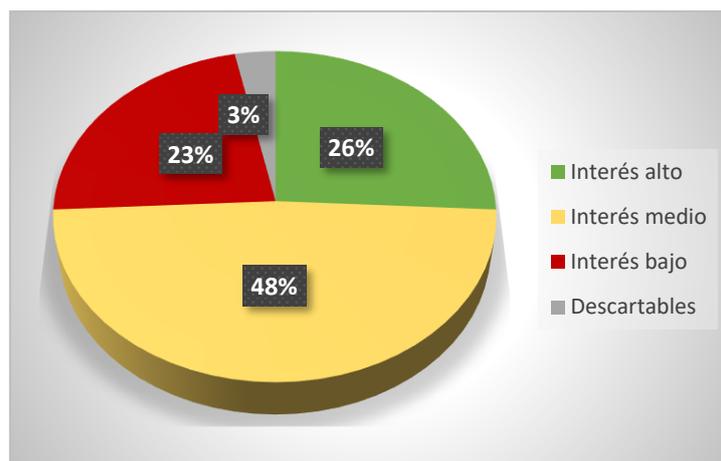


Figura 6.83. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes al espato flúor. Elaboración propia.

Los resultados obtenidos por los registros relativos al espato flúor en las diferentes dimensiones que conforman el análisis fueron muy variados (Figura 6.84.). No en vano, en cada una de estas dimensiones el grupo de interés predominante resultó ser diferente. El interés medio, con un 68%, es el más numeroso dentro de la dimensión *Perfil geológico*, el interés alto (45%) en la referente a la *aptitud del terreno* y la categoría de interés bajo (55%) en la que valora la *inserción socioeconómica*. Esta combinación de resultados, correspondiente a un potencial minero medio, es, con un 22,6% del total, la mayoritaria entre los registros incorporados a la base de datos referentes a este recurso.

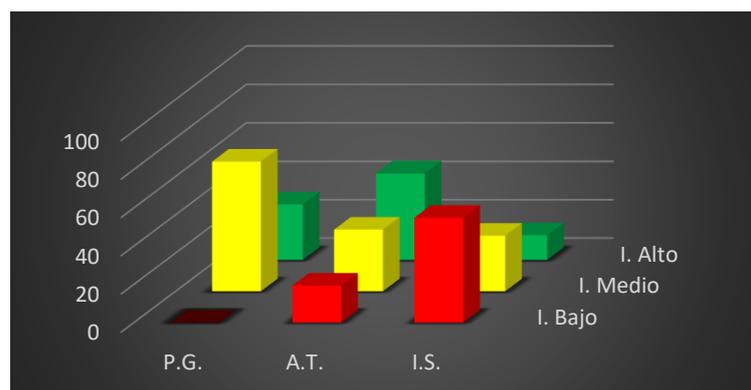
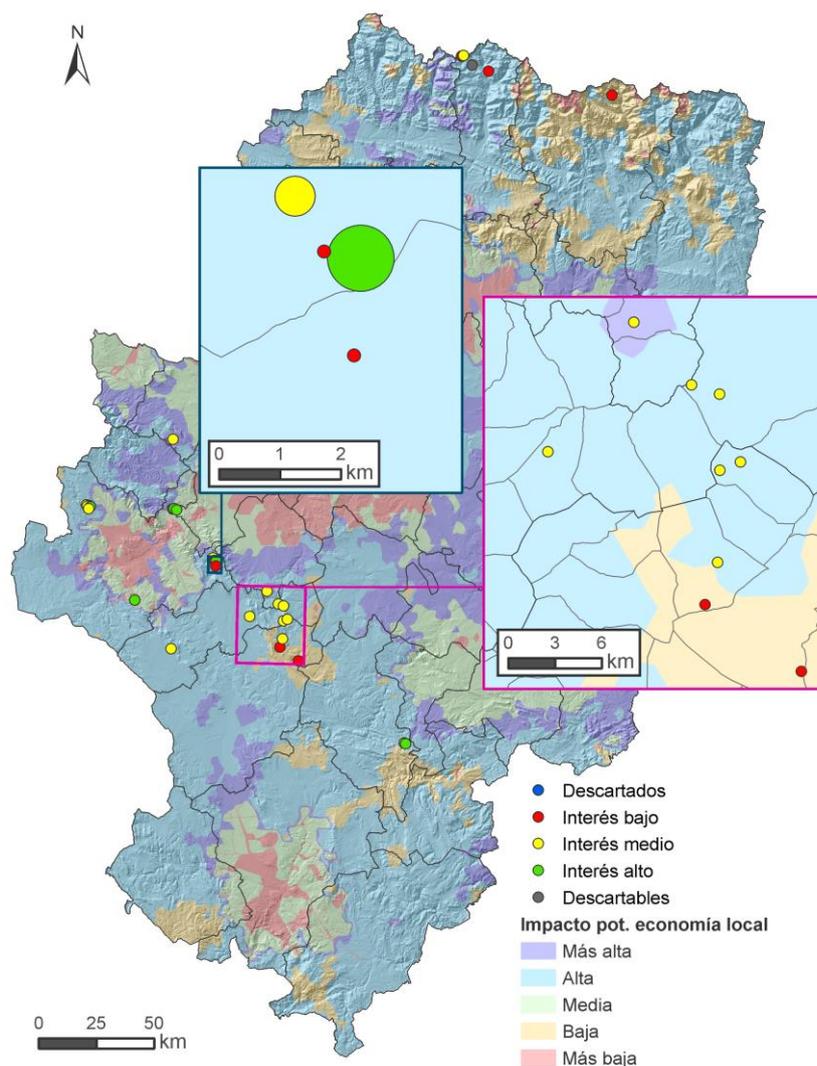


Figura 6.84. Resultados del análisis del potencial minero en cada una de las dimensiones consideradas para los registros relativos al espato flúor. Elaboración propia.



*Figura 6.85. Distribución espacial de los registros de espato flúor en la base de datos. El tamaño de los puntos en ambas ampliaciones del mapa está relacionado con las reservas estimadas del yacimiento representado. Elaboración propia.*

Desde el punto de vista espacial, ninguno de los registros situados en el área pirenaica ha sido calificado dentro del grupo de interés alto (Figura 6.85.). Tal y como se había comentado anteriormente, uno de estos elementos queda en la actualidad englobado en una ubicación descartable, mientras que tres pasaron a formar parte de la categoría de interés bajo y uno a la de interés medio. Sin embargo, la mayor parte de los registros referentes al espato flúor se sitúan en los dominios de la Ibérica, entre la Sierra del Maestrazgo y la del Moncayo. Los resultados obtenidos por este conjunto de elementos son muy variables, si bien casi la mitad de ellos pertenece a la categoría de interés medio.

De los 27 indicios incorporados a la base de datos (Figura 6.86.), más de un 20% han sido catalogados como de interés bajo, mientras que un porcentaje mayor, que roza el 30%, obtuvo resultados positivos en el análisis de interés minero. En cuanto a los tres derechos mineros registrados en el Catastro, es el localizado en la Ibérica turolense el único que muestra un interés alto, mientras que los situados en el Pirineo han sido calificados como de interés medio y bajo, respectivamente.

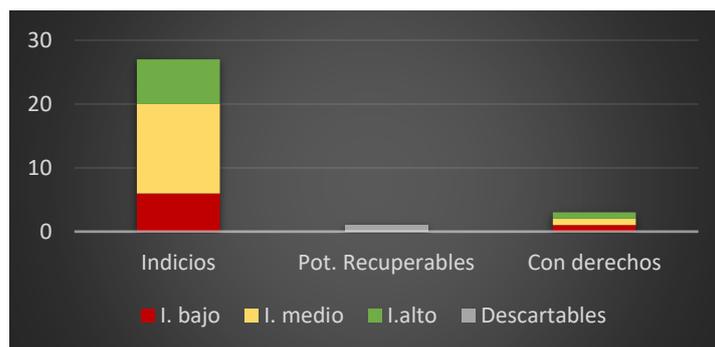


Figura 6.86. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes al espato flúor agrupados por estado de actividad. Elaboración propia.

### 6.3.16. Fósforo (Elementos críticos: minerales metálicos)

Los resultados del análisis para los puntos inventariados referentes al fósforo (Figura 6.87.) muestran un claro predominio de los catalogados como de interés alto, 60%, frente a los de interés medio o bajo (20%).

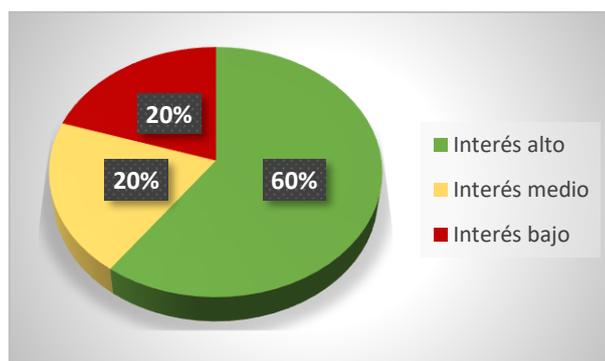


Figura 6.87. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes al fósforo. Elaboración propia.

Debido al elevado valor estratégico de este recurso, ninguno de los registros analizados obtuvo una calificación baja en la dimensión *Perfil geológico*, siendo el grupo de interés alto el más numeroso en esta dimensión (Figura 6.88.). En las otras dos dimensiones consideradas en el análisis, el porcentaje de elementos incorporados a las clases de interés más alto es también elevado, lo que condiciona los buenos resultados globales del potencial minero para este recurso.

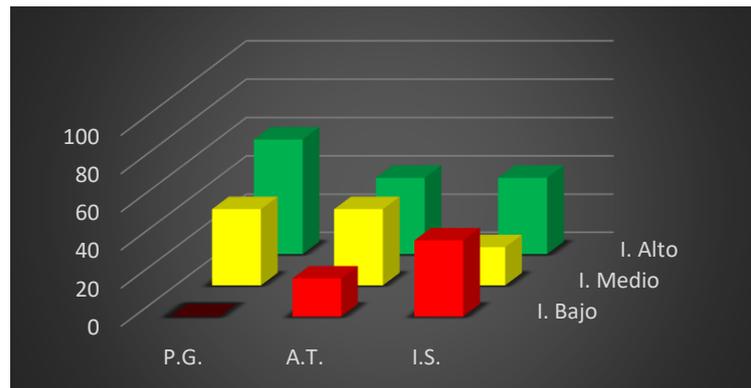


Figura 6.88. Resultados del análisis del potencial minero en cada una de las dimensiones consideradas para los registros relativos al fósforo. Elaboración propia.

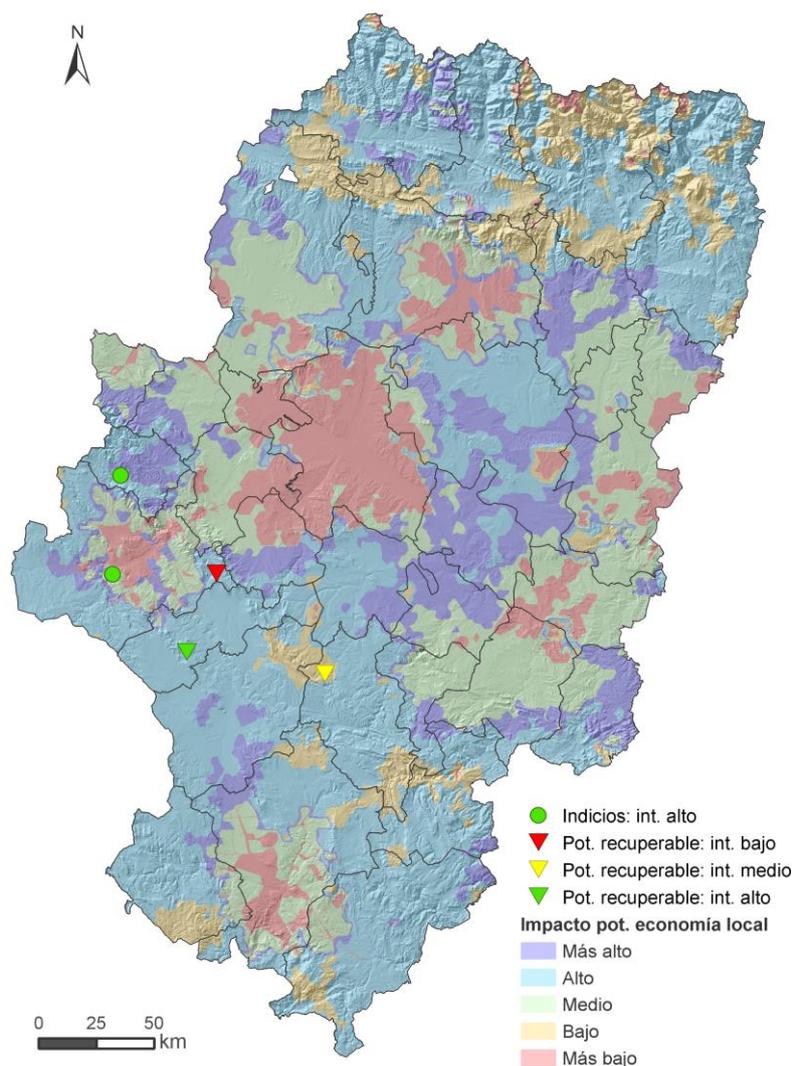


Figura 6.89. Distribución espacial de los registros de fósforo en la base de datos. Elaboración propia.

En el caso del fósforo, los resultados del análisis no muestran un patrón espacial definido (Figura 6.89.). No obstante, son los elementos localizados en el margen occidental de la comunidad, dentro del dominio de la Cordillera Ibérica, los que muestran unos valores de interés mayores.

### 6.3.17. Grafito (Elementos críticos: minerales industriales)

Todos los registros incorporados al inventario referentes al grafito se corresponden con indicios, excepto una concesión de exploración descartada en la provincia de Teruel. Dos de estos indicios, localizados en el entorno pirenaico, han obtenido en los análisis un resultado de interés bajo (Figura 6.91.), mientras que otro, también ubicado en el mismo contexto territorial, ha sido catalogado como de interés medio. Por el contrario, el situado en la

localidad de Alhama de Aragón, en la Ibérica de Zaragoza obtuvo una calificación positiva en el análisis.

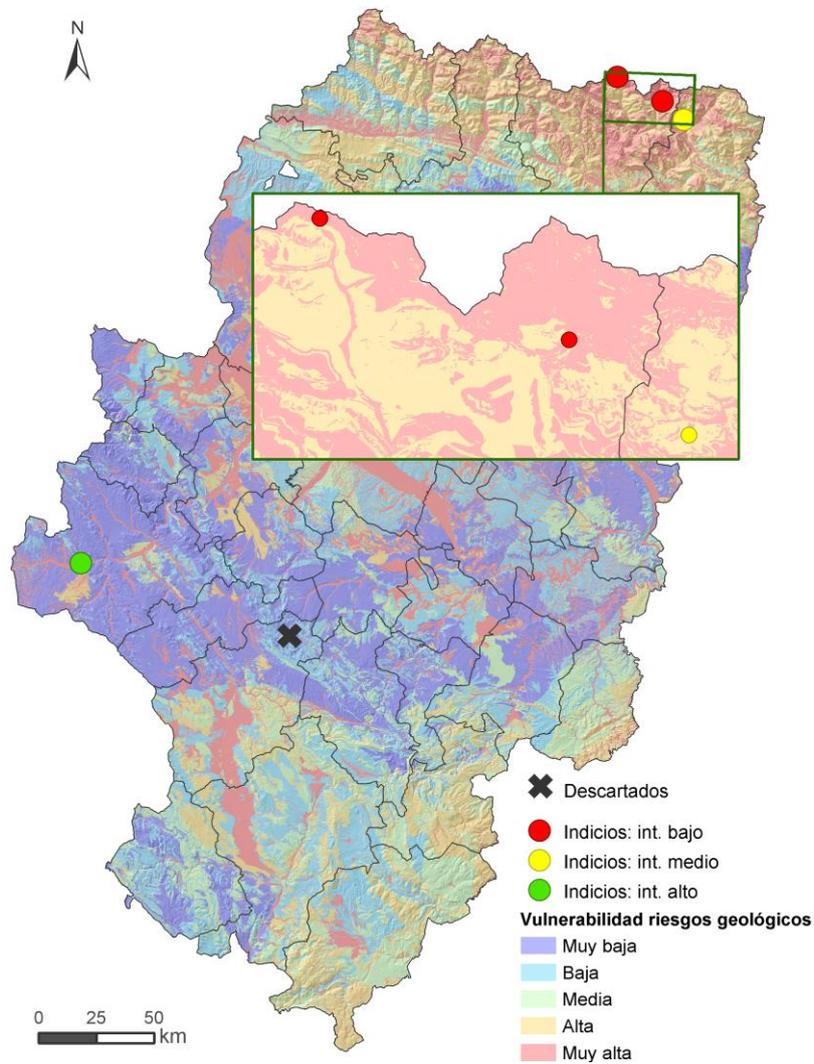


Figura 6.90. Distribución espacial de los registros de grafito en la base de datos. Elaboración propia.

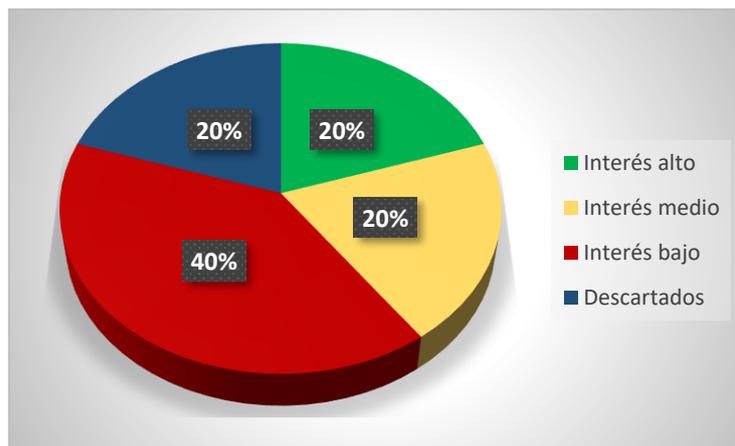


Figura 6.91. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes al grafito. Elaboración propia.

A pesar de la escasa distancia existente entre los indicios localizados en el área centro-oriental del Pirineo (Figura 6.90.), y de que todos ellos fueron catalogados en la misma categoría en las dimensiones *Perfil geológico* (interés alto) e *Inserción socioeconómica* (interés bajo), los resultados finales fueron diversos. La principal diferencia en la valoración de estos tres puntos radica en que dos de ellos se encuentran en zonas donde el riesgo por deslizamientos es alto, mientras que este riesgo era menor para el tercero.

#### 6.3.18. Magnesio (Elementos críticos: minerales metálicos)

Los resultados obtenidos por los puntos inventariados relacionados con el magnesio han sido muy positivos, puesto que el 74% de ellos ha sido clasificado como de interés alto (Figura 6.92.). Sin embargo, tres indicios han obtenido la calificación de interés bajo y uno la de interés medio.

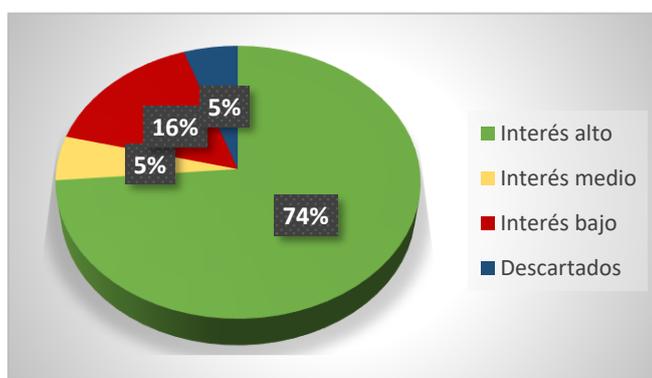


Figura 6.92. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes al magnesio. Elaboración propia.

Esta valoración tan positiva deriva, fundamentalmente, de unos resultados óptimos en la dimensión *Perfil geológico* (el 100% de los registros fue incorporado a la categoría de interés alto) y a unas condiciones del terreno donde se asienta el yacimiento muy favorables (Figura 6.93.). Por el contrario, estos resultados no fueron tan buenos en la dimensión *Inserción socioeconómica*, donde tan solo un 22% de los recursos fue incluido en la categoría de interés alto.

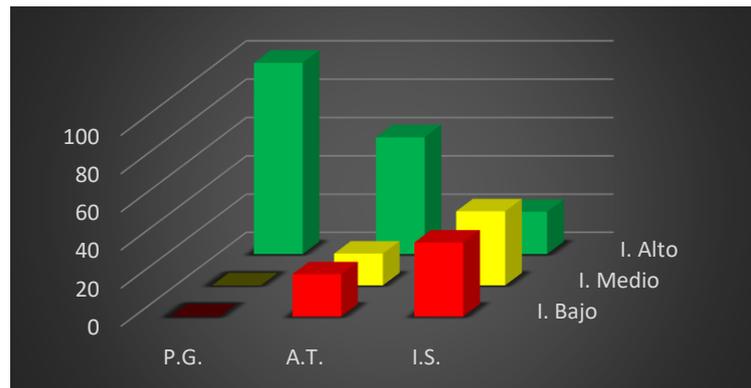


Figura 6.93. Resultados del análisis del potencial minero en cada una de las dimensiones consideradas para los registros relativos al magnesio. Elaboración propia.

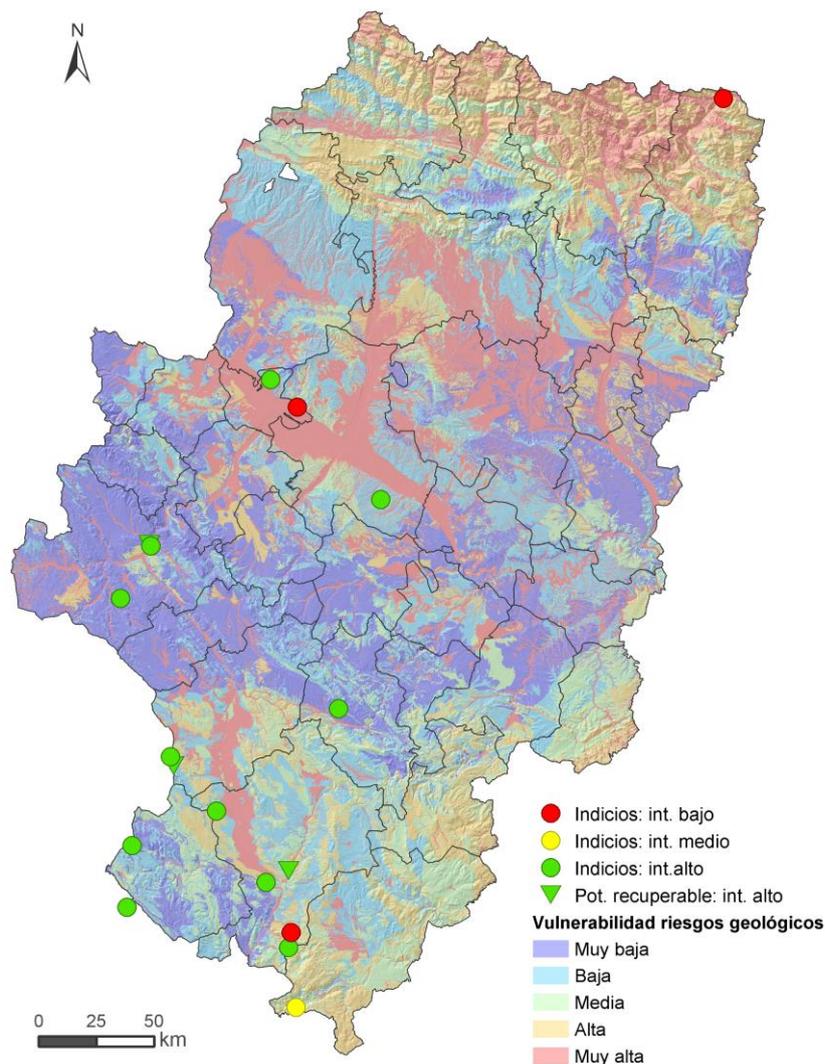


Figura 6.94. Distribución espacial de los registros de magnesio en la base de datos. Elaboración propia.

Espacialmente, los pocos indicios calificados dentro de los grupos de potencial minero medio o bajo se reparten por los tres grandes dominios del relieve Aragonés, es decir, uno se localiza en los Pirineos, otro en la depresión del Ebro y los dos restantes al sur del Sistema Ibérico. No obstante, prácticamente la totalidad de los indicios con un potencial minero elevado se localizan en los ramales del Sistema Ibérico (Figura 6.94.).

### 6.3.19. Sílice (Elementos críticos: minerales industriales)

Cuatro de los ocho registros incorporados a la base de datos que hacen referencia a la sílice se corresponden con derechos mineros. Sólo uno de los derechos mineros vigentes ha recibido la mejor valoración en el análisis efectuado, lo que supone un 12% del total de los elementos inventariados. Dos de los otros tres derechos mineros han sido asignados a la

categoría de interés medio y uno a la de interés bajo (Figura 6.95.). Para el 50% de los puntos incorporados a la base de datos referidos a la sílice fue descartada su explotación.

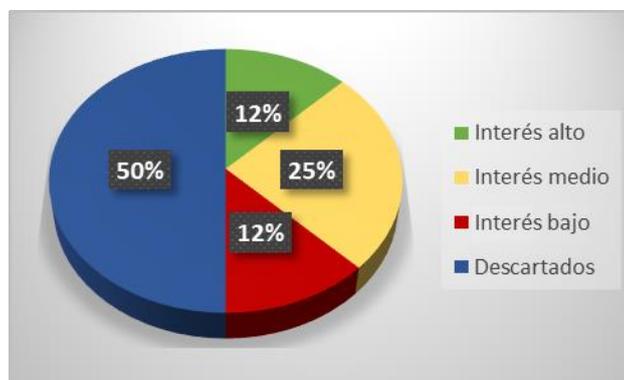


Figura 6.95. Resultados del análisis de interés minero para los registros referentes a la sílice. Elaboración propia.

Todos los registros que no se corresponden con derechos mineros descartados se localizan en el margen oriental de la provincia de Teruel (Figura 6.96.). Su diversa valoración final se encuentra condicionada por los resultados obtenidos en las dimensiones relacionadas con el territorio, puesto que todos ellos obtuvieron una calificación alta en la relativa al *Perfil geológico*.

En particular, llama la atención el caso del derecho minero denominado Bienvenida y su demasía, ambos en la localidad de Berge (Bajo Aragón). Los puntos que representan estos derechos mineros en la base de datos quedan separados por menos de un kilómetro, sin embargo, uno fue calificado como de interés alto y el otro de interés medio. En este caso el factor diferencial está relacionado con la diversa permeabilidad de los terrenos sobre los que se asienta cada uno, aunque también influyen otros elementos como la pendiente y el riesgo por colapsos.

Por otro lado, y tal y como se expuso en el segundo capítulo de la tesis, en el que se efectuó una revisión bibliográfica de los impactos derivados de la actividad minera, las partículas de sílice liberadas durante la extracción de este recurso (o de otros en los que este mineral forma parte de la roca encajante) puede generar graves problemas respiratorios a la población del entorno en el que se ubica la labor minera. De los cuatro derechos vigentes en la actualidad, dos se localizan en ubicaciones totalmente aisladas de cualquier núcleo

poblado, mientras que la población directamente expuesta en los otros dos casos ronda las 300 personas.

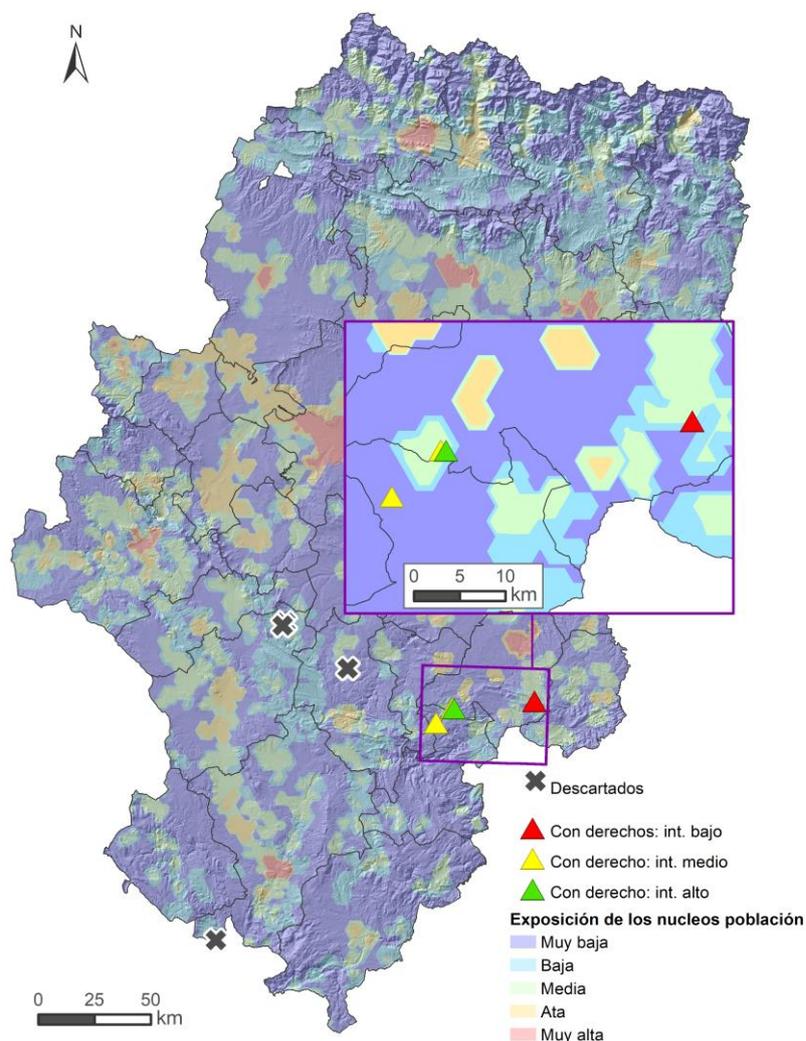


Figura 6.96. Distribución espacial de los registros de sílice en la base de datos. Elaboración propia.

### 6.3.20. Resultados globales del análisis para los elementos críticos

Si se examinan los resultados globales obtenidos en el análisis de potencialidad minera por los registros inventariados correspondientes con elementos críticos (Figura 6.97.), puede observarse como una amplia mayoría han sido calificados dentro del grupo de interés alto (54%). La categoría de interés menos frecuente, con un 18%, es la correspondiente al nivel más bajo. Por otra parte, siete elementos forman parte de los descartados, mientras que uno se ubica en una localización descartable, al estar dentro de la extensión de una pista de esquí pirenaica.

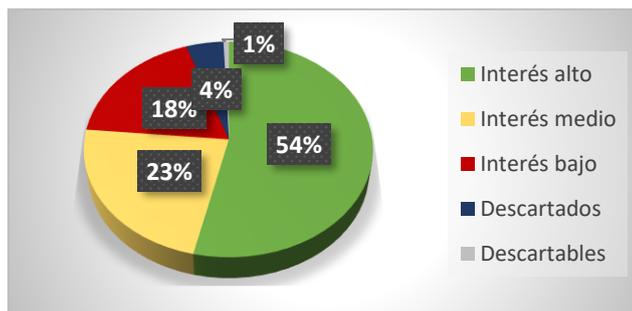


Figura 6.97. Porcentaje de registros referentes a elementos críticos clasificados en cada categoría de interés. Elaboración propia.

#### 6.4. RECAPITULACIÓN FINAL

De los más de 5.000 puntos recogidos en el inventario referentes a indicios, yacimientos, derechos mineros y minas y canteras, actuales o abandonadas, un 30% del total (más de 1.500) fueron incorporados a la categoría de interés alto. Un 25% de ellos obtuvieron una calificación de interés medio, mientras que el grupo de interés con una mayor proporción de elementos incorporados, con casi 1.900 y representando un 37,5% del total, coincide con el de interés bajo.

Según el estado de actividad, son las minas y canteras activas en el momento actual las que han obtenido unos resultados globales más positivos. No en vano, el 72% de los registros referentes a yacimientos en explotación fueron incorporados a la categoría de interés alto. Este porcentaje se reduce hasta el 40% entre los derechos mineros y a menos del 30% entre las antiguas explotaciones y los indicios de mineralizaciones. En estos dos últimos estados de actividad dominan los elementos calificados como de interés negativo, puesto que, prácticamente, uno de cada dos registros pertenece a la categoría de interés bajo.

Dentro del grupo de las aguas, los registros predominantes son los correspondientes a la categoría de interés alto (52%), siendo el único, junto con las rocas ornamentales (42%), en el que el número de elementos catalogados como de interés alto supera a los de interés bajo. En el resto de categorías de recursos analizadas el porcentaje de elementos incluidos dentro del grupo de interés alto ronda el 30% (el más bajo, 25%, se da entre los recursos

energéticos), mientras que la categoría de interés bajo supera el 35% en todos los casos, e incluso alcanza el 45% entre los minerales metálicos.

En los recursos analizados individualmente se ha podido observar los fuertes contrastes existentes. En el caso del hierro, por ejemplo, casi la mitad de los elementos analizados alcanzaron valores que se correspondían con el estado de interés más alto. En las arcillas (38%) y en el manganeso (33%), el porcentaje de elementos de interés alto superaba al relativo a los registros de interés bajo. Por el contrario, en el caso de la bauxita ninguno de los elementos catalogados pertenecía a la categoría de interés alto, mientras que el 92% de los registros relativos al uranio fue catalogado como de interés bajo.

Los resultados globales obtenidos por los elementos catalogados como críticos por la Unión Europea son francamente positivos, puesto que el 54% de los registros obtuvieron una calificación de interés alto por solo un 18% de interés bajo. En recursos como el antimonio (85%), el magnesio (74%), la barita (55%) y el fósforo (50%), los elementos calificados dentro de la categoría de interés alto son, con mucha diferencia, los más frecuentes. Por el contrario, en el cobalto y el grafito son más numerosos los puntos relativos al interés bajo.

Finalmente, entre las muestras tomadas para el análisis del potencial como rocas madres generadoras de hidrocarburos de algunas formaciones margosas y pizarrosas de la Cordillera Ibérica turolense, predominaban los registros correspondientes al nivel de interés más bajo (45%) frente a los catalogados dentro del grupo de interés alto (32%).

# Capítulo VII: Recapitulación final

7.1. Revisión de los objetivos

7.2. Líneas de actuación futura

7.3. Consideraciones finales

## RECAPITULACIÓN FINAL

Al inicio de la tesis fueron planeados tres objetivos básicos cuyo cumplimiento se juzgó imprescindible para dar respuesta a las cuestiones planteadas en relación con el estudio del potencial minero de la región. Dichos objetivos consistían, de forma muy breve, en la elaboración de un inventario actualizado de los recursos minerales, energéticos y aguas de la región, en el análisis del interés minero de los registros incorporados en la base de datos considerando varias de sus dimensiones, la creación de una plataforma de visualización de la información manejada y de los resultados de la tesis, así como la generación de un paquete de herramientas conveniente para la exportación de la metodología seguida a otros contextos geográficos. Adicionalmente, y como parte del proyecto englobado en esta tesis y financiado por el Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón (IUCA) de la Universidad de Zaragoza “Los recursos energéticos y el desarrollo territorial de Aragón. Análisis y propuestas en un nuevo escenario global”, fue incorporada una meta adicional, incluida como un elemento de interés especial dentro del resto de los objetivos, consistente en el análisis del potencial generador de hidrocarburos de algunas formaciones geológicas que afloran en la región.

En el primero de los tres siguientes subapartados se evalúa el cumplimiento de los objetivos planteados al comienzo de la tesis, así como los resultados obtenidos. En el segundo se incluirán una serie de acciones marcadas como líneas de actuación una vez concluida la tesis. Además se aportarán, en un tercer subapartado, unas breves consideraciones finales sobre el trabajo realizado.

## 7.1. REVISIÓN DE LOS OBJETIVOS

Siguiendo la secuencia metodológica descrita en la conclusión del Capítulo II de la tesis han podido ser cumplidos los objetivos marcados al comienzo de la fase de trabajo. Durante este subcapítulo se realiza una revisión sistemática de dichos objetivos, analizando las tareas desarrolladas para su cumplimiento y los resultados obtenidos.

### 7.1.1. Establecer una tipología y un diagnóstico actualizados de los recursos mineros, energéticos y las aguas de Aragón, prestando especial atención a los catalogados como críticos por la UE

Para la resolución del primero de los objetivos planteados al comienzo de la tesis se decidió realizar un inventario en forma de base de datos espacial que albergara información sobre las explotaciones de minerales y aguas -actuales o históricas- yacimientos e indicios presentes en la Comunidad Autónoma de Aragón. Los datos básicos para la elaboración de dicho inventario proceden de numerosas fuentes, entre las que se incluyen el Catastro minero, el Mapa Geológico de España, servicios WMS del Instituto Geológico y Minero y varias publicaciones impresas. Como los datos que conforman el inventario fueron obtenidos a partir de diferentes fuentes, realizadas por autores diversos, los métodos que emplean para transmitir la información serán también variables. Algunas de las fuentes se encontraban ya digitalizadas desde el punto de vista geográfico, es decir, con coordenadas que ubicaban las explotaciones mineras, los yacimientos y los indicios de un modo espacial. En otras, en cambio, la información proporcionada sobre la situación y las características de estos recursos en el territorio aragonés se describía a través de textos.

Como las fuentes consultadas para la adquisición de la información fueron tan variadas, tanto en el formato como en la manera de trasmitirla, para la elaboración de la base de datos unificada debieron ser realizadas diversas tareas de homogeneización e interpretación de los datos, incluyendo la digitalización espacial de la información que lo requiriera, la transformación de elementos representados en las fuentes como superficies en entidades puntuales, la eliminación de datos procedentes de fuentes diversas referidos al mismo elemento y la unificación de nomenclaturas.

El resultado parcial del flujo de trabajo apenas descrito, encaminado hacia la resolución del primero de los objetivos propuestos, coincide con la base de datos unificada de los recursos minerales, energéticos y aguas de la Comunidad Autónoma de Aragón. De forma exacta, la base de datos consta de 5.061 registros que representan explotaciones de minerales o aguas, derechos mineros, yacimientos e indicios minerales correspondientes a 101 tipos de recursos diversos. En términos absolutos, el tipo de recurso con un mayor número de registros en la base de datos son las gravas (Figura 7.1.), con 738, seguidas por el carbón (695) y las calizas (455). Las explotaciones activas en el momento de la generación de la base de datos eran, exactamente, 266, la mayoría dedicadas a la extracción de gravas (81), arcillas (37) y calizas (31).

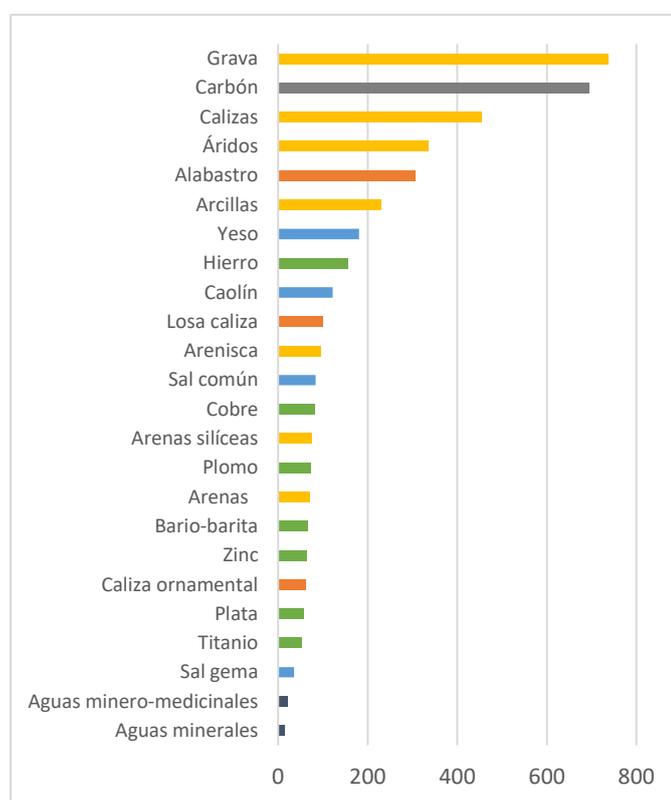


Figura 7.1. Número de registros correspondientes a explotaciones, derechos mineros, yacimientos e indicios minerales de los elementos más numerosos en cada categoría de recursos. Elaboración propia

De cara a la ejecución del análisis de interés minero correspondiente al segundo objetivo de la tesis, estos recursos fueron reclasificados en seis categorías diversas: *aguas, rocas industriales, minerales industriales, minerales metálicos y recursos energéticos*. Las rocas industriales son, con mucha diferencia sobre el resto, las que cuentan con un mayor número

de registros en la base de datos, con más de 2200 puntos inventariados (Figura 7.2.). Les siguen los recursos energéticos, los minerales metálicos, los minerales industriales, las rocas ornamentales y, finalmente, las aguas.

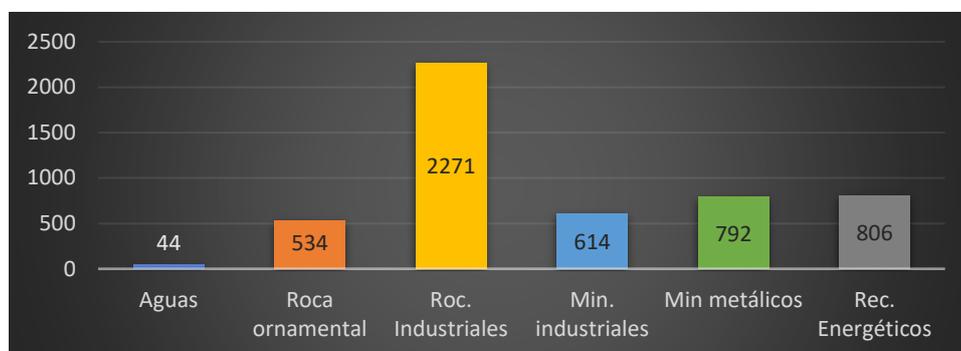


Figura 7.2. Número de registros incorporados en la base de datos por categoría de recursos. Elaboración propia.

Las rocas industriales son, asimismo, las que contaban con un mayor número de explotaciones activas en el momento en el que se realizó este inventario, con 198 labores. Con 38 le siguen las rocas ornamentales, mientras que en el resto de las categorías de recursos el número de labores activas se sitúa en un intervalo comprendido entre las 15 de los minerales industriales y una en el caso de los recursos energéticos.

Cabe destacar que el análisis espacial de la base de datos generada permitió observar una distribución de los registros muy desigual dentro del territorio aragonés. A nivel provincial, la inmensa mayoría de los puntos recogidos en el inventario se localizaban en Teruel (45%) y Zaragoza (40%). La provincia de Huesca era la que presentaba un menor número de registros, con tan solo 755. Por su parte, las comarcas de la D.C. de Zaragoza, la Comunidad de Calatayud y las Cuencas Mineras turolenses superaban los 300 registros, mientras que cinco comarcas turolenses, una zaragozana y una oscense presentaban entre 200 y 300 puntos inventariados.

Por otra parte, en la bibliografía empleada para la realización del inventario han sido localizadas referencias relativas a 8 de los 27 elementos catalogados como críticos por la Unión Europea. Concretamente, han sido inventariados 151 registros correspondientes a labores antiguas, derechos mineros e indicios de antimonio, barita, cobalto, espato flúor, fosfatos, grafito, magnesio y sílice. Casi la mitad de los puntos inventariados referentes a

elementos críticos se sitúan en la extensión de la provincia de Zaragoza, mientras que un 42% lo hacen en la de Teruel. Huesca cuenta tan solo con un 11% de total. Por tipo de recurso, la barita es el elemento que cuenta con un mayor número de registros en la base de datos, 67, la gran mayoría correspondiente a indicios, seguido por el espato flúor (31), el magnesio (18) y el antimonio (13).

En la actualidad no existen labores activas que extraigan ninguna de las materias primas catalogadas como críticas por la UE, si bien se han identificado antiguas explotaciones de todos los recursos antes nombrados, excepto de grafito y de sílice. Además, existen 8 derechos mineros recogidos en el catastro que podrían derivar en explotaciones efectivas en un futuro cercano. La explotación de sílice ha motivado la solicitud de cuatro de estos derechos mineros, mientras que 3 se corresponden con el espato flúor y uno con la barita.

Con respecto al estudio de determinadas unidades geológicas aflorantes en el territorio aragonés para el análisis de su potencial como rocas generadoras de hidrocarburos, fueron tomadas 118 muestras correspondientes a nueve unidades geológicas de diversa naturaleza, recogidas en 11 ubicaciones diferentes.

Estas 118 muestras rocosas tomadas en el campo fueron sometidas a un proceso de molienda y tamizado que pulverizara las muestras para la correcta realización de un análisis calcimétrico en los laboratorios del Departamento de Estratigrafía y Sedimentología de la Universidad de Zaragoza. Las 22 muestras que presentaban unas características más interesantes fueron enviadas a un laboratorio independiente, concretamente a los Servicios de Apoyo a la Investigación (SAI) de la Universidad de A Coruña, para la efectucción de un análisis TOC que estableciera el contenido en materia orgánica albergado en la muestra. Este valor es fundamental en la determinación del potencial de generación de hidrocarburos de la unidad geológica. Las 22 muestras analizadas, junto con los resultados obtenidos en el análisis, fueron incorporadas como indicios en la base de datos, dentro de la categoría de recursos energéticos.

### 7.1.2. Analizar y evaluar el potencial de aprovechamiento de estos recursos y el impacto territorial previsible que supondría la puesta en marcha de una actividad minera ligada a ellos

Para el cumplimiento de este objetivo se decidió abordar un análisis multicriterio que incluye numerosos aspectos referentes a la actividad minera y a sus impactos en el medio natural y humano. Este análisis trata de determinar el interés minero que presentan los elementos registrados en la base de datos generada, analizada en el apartado anterior, y que constituye el resultado principal del proceso desarrollado para el cumplimiento del primer objetivo planteado en la tesis.

El concepto de *interés minero* trabajado en esta tesis está relacionado con la definición de minería sostenible plasmada por Oyarzun, Higuera y Lillo (2011) que plantean que, aceptando que la minería afecta necesariamente al medio natural y humano en el entorno de la explotación, la sostenibilidad es el concepto que permite dar buena la afección, de modo que se cubran las necesidades humanas sin que ello suponga la destrucción de medio afectado. También coincide con la propuesta por el Departamento de Industria, Innovación y Ciencia del Gobierno de Australia, que consiste en el aprovechamiento de los *“recursos minerales y energéticos de tal modo que se maximicen los beneficios económicos y sociales mientras que se minimicen los impactos medioambientales derivados de la actividad minera”*. De este modo, el análisis intenta dar respuesta a la pregunta de si el impacto que supone la explotación del recurso queda justificado por el beneficio obtenido. Para responder a esta pregunta es necesario determinar, a su vez, otras tres cuestiones claves de la minería:

- ¿Tiene el yacimiento un interés económico y estratégico suficiente?
- ¿Cómo se adecúa el territorio a la actividad minera y cuál será su respuesta ante los impactos generados por las labores extractivas?
- ¿En qué grado se verán afectados por la actividad minera los diferentes compartimentos del medio natural y humano?

Por este motivo, el análisis multicriterio propuesto se estructura en tres dimensiones fundamentales denominadas, respectivamente, *Perfil geológico*, *Aptitud del terreno* e *Inserción socioeconómica*.

Cada una de estas dimensiones está conformada por una serie de indicadores relativos a los cuerpos mineralizados, a las características del producto explotable, a las peculiaridades del territorio donde se localizan o a las interacciones que se establecerían entre las potenciales labores mineras y los elementos ubicados en el entorno que las rodea. Como se comentó en el apartado anterior, relativo a la resolución del primero de los objetivos planteados, los diferentes recursos presentes en el territorio fueron reclasificarlos en una serie de categorías, con el objetivo de individualizar el análisis de interés minero propuesto. De este modo, el peso que supone cada indicador en el resultado final será diferente según la categoría de recursos considerada. Además, no todos los grupos van a ser valorados con los mismos indicadores, puesto que algunos de ellos no son aplicables a ciertas categorías, mientras que otros han sido planteados, exclusivamente, para algunos de estos grupos de recursos.

Concretamente, en la valoración de la primera de las dimensiones, *Perfil geológico*, fueron considerados 5 indicadores diferentes, relativos a las particularidades del yacimiento o cuerpo mineralizado y al carácter crítico para la economía europea del producto explotable. Por cuestiones técnicas, el grupo de las aguas solo fue valorado según su estado de actividad, puesto que el resto de indicadores no son aplicables. Por su parte, para el grupo de recursos nombrados a lo largo de esta tesis con el nombre de *hidrocarburos no convencionales*, fue incorporado un criterio adicional, relativo a los resultados obtenidos en el análisis del TOC.

Todas las categorías de recursos que componen el inventario fueron analizadas a través de tres indicadores diversos en la dimensión aptitud del terreno. Dos de ellos, los relativos a la generación y difusión del drenaje ácido de minas y a la vulnerabilidad frente a eventos naturales extremos, son especialmente complejos, puesto que resultan de la combinación ponderada de numerosos factores. Así, por ejemplo, el indicador referente a los riesgos naturales ajusta la información relativa a los mapas de riesgo de seis procesos naturales

diversos, cuyo peso relativo en el indicador final estará condicionado por su capacidad destructiva y por su frecuencia relativa dentro del contexto territorial aragonés. Por su parte, el grupo de las aguas fue analizado mediante un indicador adicional, relativo a la capacidad de recarga de los acuíferos, que incorpora factores como la precipitación media anual y la permeabilidad del sustrato.

Para la valoración de la dimensión *Inserción socioeconómica* fueron incluidos siete indicadores, comunes para todos los grupos de recursos analizados, si bien la manera de valorar los recursos comprendidos dentro del grupo de las aguas será ligeramente diverso por el carácter renovable de las mismas. De este modo, se otorgó un peso relativo superior al indicador que valora el impacto potencial en la económica local, a costa de reducir los correspondientes a las afecciones al ser humano, al paisaje y a la cubierta vegetal, considerablemente menos importantes en este tipo de extracciones.

Como resultado del análisis apenas descrito se obtuvo un valor de interés minero conjunto, que combina los resultados de las tres preguntas planteadas relativas al interés económico y estratégico del yacimiento, a la adecuación del territorio para la actividad minera y al impacto en el medio natural y humano. Cabe recordar que los resultados del análisis sirven para comparar los registros incorporados en la base de datos entre sí dentro del contexto territorial aragonés, puesto que los intervalos numéricos establecidos para determinar la pertenencia a una u otra categoría se establecieron en función de los resultados globales obtenidos. También la categorización de los indicadores empleados en el análisis fue establecida considerando las particularidades de la Comunidad Autónoma de Aragón.

El grupo de las aguas fue el que recibió una valoración global más positiva en el análisis efectuado, puesto que casi el 50% de los registros correspondientes a este tipo de recursos fue incorporado a la categoría de interés alto. Le siguen las rocas ornamentales, con un 40% y las rocas industriales con casi el 30%. Este mismo grupo de recursos, justo después del conformado por los minerales metálicos (45%), es el que presenta un mayor número de registros catalogados como de interés bajo, con un 39% del total. El porcentaje de

elementos de interés bajo supera el 30% también en los grupos correspondientes a los minerales industriales y los recursos energéticos.

Según el estado de actividad en el que se encuentran los elementos registrados en la base de datos, los yacimientos que están siendo explotados en el momento actual presentan una valoración global más positiva, puesto que el 72% del total pertenece al grupo de interés más alto, por tan solo un 28% de elementos de interés bajo. Estos resultados se invierten dentro del grupo de los indicios, donde un 55% fue incluido en la categoría de interés bajo.

Considerando todos los registros inventariados dentro de la base de datos, con independencia de su categoría o estado de actividad, los de interés bajo resultaron los más numerosos (38%), seguidos de cerca por los de interés alto (30%). Además, un 1% de los registros se localizaban dentro de áreas que podrían considerarse como descartables por motivos medioambientales o económicos, al interactuar con ubicaciones en las que se están desarrollando actividades económicas más rentables o cuya inversión previa justifique su mantenimiento en el tiempo.

Los resultados obtenidos en el análisis de interés minero por los recursos catalogados como críticos por la Comisión Europea fueron, en conjunto, mucho más positivos que los resultados globales. No en vano, más del 50% de los registros correspondientes a recursos críticos fueron calificados como de interés alto, por solo un 18% de interés bajo. Considerando los recursos de forma individual, elementos como el antimonio (85%), el magnesio (74%) o la barita (55%), superaban el porcentaje medio de registros catalogados dentro del interés más alto.

Finalmente, y como se comentó al inicio de este subapartado, la valoración del interés minero de las formaciones geológicas con potencial para la generación de hidrocarburos fue estimada empleando un indicador que se corresponde con los resultados del análisis del contenido en carbono orgánico de la muestra (análisis TOC). Según los rangos establecidos por McCarthy (2011), que relacionan el porcentaje en carbono orgánico con la calidad como roca generadora, de las 22 muestras analizadas, una recibió una calificación de excelente, 5 entraron en la categoría de buenas, 8 en la de regulares, 7 en la de pobres y una no presentaba ningún potencial. Incluyendo las otras dos dimensiones del análisis, relacionadas

con el territorio y lo que sobre él se localiza, un 32% de los registros incorporados a la categoría de *hidrocarburos no convencionales* fue catalogado como de interés alto, frente a un 45% de los registros que fueron incluidos dentro de la clase de interés más bajo.

### 7.1.3. Generar el paquete de herramientas oportuno para la traslación de la metodología de análisis propuesta a otros territorios, minimizando los tiempos de trabajo, y crear una plataforma de visualización que permita difundir los resultados del estudio

Para alcanzar la primera parte de este objetivo, relacionado con la creación de un paquete de herramientas que permita el trasvase de la metodología de análisis empleada a otros contextos territoriales, fue fundamental la utilidad incorporada en el entorno de ArcGIS conocida como *Model Builder*. Dicha utilidad permite la elaboración de modelos complejos compuestos por varios geoprocesamientos conectados. Además, la posibilidad de incorporar iteradores, es decir, elementos que permiten la repetición varias veces de un mismo geoprocesamiento, facilitó la automatización de los diferentes análisis, ahorrando una cantidad de tiempo considerable.

Empleando *Model Builder* fueron creados numerosos modelos de análisis. Concretamente, se generó una herramienta diferente para cada uno de los indicadores propuestos en el análisis e, incluso, variaciones de dichos modelos cuando la diversa forma de valorar un indicador para las distintas categorías de recursos así lo requiriera. Asimismo, fueron generadas diversas herramientas para resolver la categoría de interés a la que pertenece el recurso en cada una de las dimensiones estudiadas, otras para la resolución del valor de interés final atendiendo a la categoría de recursos considerada y, finalmente, un modelo para establecer la simbología adecuada de cara a su representación cartográfica.

Es relevante señalar que las herramientas generadas permiten la modificación de los datos de entrada, incluyendo la capa que alberga la información sobre la distribución de los recursos en el territorio, los datos cartográficos auxiliares y los parámetros numéricos empleados en los análisis con el objetivo de adecuarlos a las peculiaridades del nuevo contexto geográfico. Por otra parte, cabe destacar que el modelo generado para el análisis de los recursos minerales de Aragón es flexible y permitiría ser modificado según los criterios deseados por el interesado.

Cabe destacar que la metodología de análisis empleada para la evaluación de los recursos minerales, energéticos y aguas de Aragón no ha sido todavía empleada en territorios diferentes, por lo que no se ha podido verificar la funcionalidad de las herramientas en otros contextos geográficos. Sin embargo, durante la estancia doctoral en el Laboratorio de Análisis y Representaciones Territoriales y Urbanas (*Laboratorio di Analisi e Rappresentazione Territoriale e Urbane*, LARTU) del Politécnico de Turín, pude trabajar, gracias a las Dras. Taddia y Bottero y al Dr. Lo Russo, en la elaboración del Mapa de Canteras del Piamonte (Figura 7.3.) englobado dentro del Plan Regional de las Actividades Extractivas (*Piano Regionale delle Attività Estrattive*, PRAE). En este proyecto fue posible experimentar con variaciones en la metodología empleada para la adquisición de datos y generar una nueva base de datos relativa a los recursos minerales en un contexto territorial tan diferente del aragonés. Para ello fue necesario realizar un proceso de búsqueda y adquisición de información relativa a los recursos de esta región italiana y adaptar las características de la base de datos a las necesidades específicas del proyecto, enfocado solamente a los materiales extraídos en canteras. Los recursos incorporados a este inventario se corresponden con las categorías denominadas en la tesis como *rocas industriales*, *minerales industriales* y *rocas ornamentales*. Además, las canteras inventariadas fueron diferenciadas según su estado en activas e inactivas y estas últimas, a su vez, divididas en función de si habían sido restauradas o no.

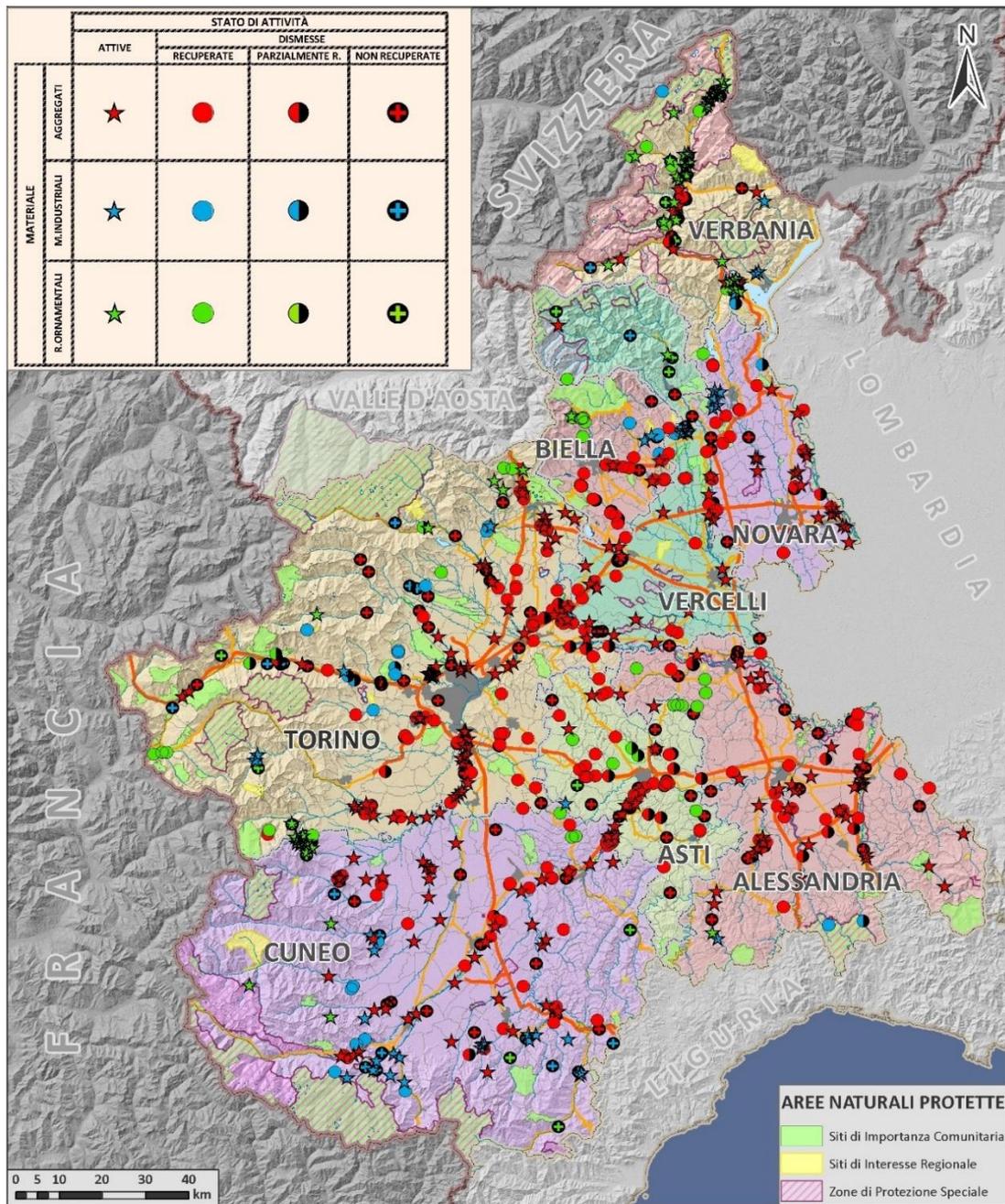


Figura 7.3. Mapa de las canteras del Piemonte (Carta delle cave della Regione Piemonte). Elaboración propia.

Para el cumplimiento de la segunda parte de este objetivo, relativo a la creación de una plataforma de difusión, visualización y consulta de los resultados obtenidos de todo el proceso de trabajo, se decidió generar una aplicación web dotada de interactividad. Dicha aplicación fue generada mediante la utilidad denominada *Web AppBuilder*, incluida en el entorno de *ArcGIS*.

Más allá de la información relativa a la base de datos de los recursos minerales y de los resultados del análisis al que fueron sometidos dichos recursos, la aplicación web incorpora numerosas herramientas destinadas a la interacción del usuario con la información albergada. Algunas de estas herramientas permitirán calcular las zonas directamente expuestas a las labores mineras registradas, localizar los yacimientos más cercanos a una determinada población u obtener estadísticas inmediatas sobre la distribución de los recursos en el territorio.

## 7.2. LÍNEAS DE ACTUACIÓN FUTURA

Los resultados derivados del flujo de trabajo, encaminado al cumplimiento de los objetivos planteados al comienzo de la tesis y que se encuentran plasmados tanto en este documento como en la aplicación web generada como en el paquete de herramientas creado para la exportación de la metodología a otros contextos territoriales, pueden convertirse en un instrumento de utilidad para las autoridades políticas a nivel local y regional, así como para las empresas del sector minero. La información contenida en este trabajo puede ayudar a la toma de decisiones de índole ambiental, estratégica y económica en relación con los recursos minerales aragoneses, persiguiendo formas de actuación más sostenibles y efectivas en relación con las materias primas y los depósitos minerales, así como a asegurar los enlaces óptimos entre la planificación territorial y la garantía en la salvaguarda de los depósitos minerales más interesantes, con el objetivo de asegurar el acceso actual y futuro a los mismos, de modo que se evite su “esterilización”.

Conscientes de todo ello, una vez completo el proceso de trabajo y conseguidos los objetivos marcados al inicio del mismo, se juzgó necesaria la futura implantación de las siguientes acciones encaminadas a la promoción y difusión de la información recopilada entre las autoridades competentes y los agentes implicados en la toma de decisiones en el sector minero:

1. Traslado a las Instituciones y agentes sociales pertinentes de las conclusiones obtenidas.
2. Publicación de los resultados definitivos de la investigación.

3. Valoración de las oportunidades para la prosecución de la investigación en este campo, así como de la posibilidad de repetir la investigación en otros territorios.

### 7.3. CONSIDERACIONES FINALES

Como conclusión de esta tesis serán expuestas una serie de consideraciones finales relativas a las particularidades del trabajo desarrollado:

- La minería es una actividad dinámica en la que, en ocasiones, las empresas deciden clausurar determinadas labores extractivas o, por el contrario, algunos de los derechos mineros recogidos en el catastro evolucionan hacia la apertura de una nueva mina o cantera, mientras que otros son descartados definitivamente. Por otra parte, los criterios empleados en el análisis también evolucionan con el tiempo: los núcleos de población pueden crecer o ver reducido su número de habitantes, es posible que se mejoren y se construyan nuevas infraestructuras, o se clausuren otras, los usos a los que se destina cada porción del terreno variarán, la administración puede proponer nuevos espacios como meritorios de ser conservados por sus características ambientales o culturales, etc. El trabajo presentado en esta tesis supone una fotografía del estado de la cuestión y de su contexto geográfico en un intervalo de tiempo comprendido entre los años 2015 y 2019, por lo que, para mantener su vigencia, deberá ser sometido a revisión periódica.
- Como se ha podido comprobar hasta el momento, la minería es un tema complejo en la que intervienen numerosos factores de muy diversa naturaleza: geológica, geopolítica, ambiental, socioeconómica... En los estudios de viabilidad minera son analizados un gran número de factores ligados al yacimiento y su entorno, al impacto ambiental y a la restauración de los terrenos, a la coyuntura económica y a la tecnología y maquinaria necesarias para poder desarrollar la explotación y el beneficio del mineral. Son más factores que los que han sido empleados en el análisis propuesto en esta tesis, sin embargo, cabe destacar que los estudios de viabilidad económica son específicos para explotaciones concretas y no para un contexto regional, por lo que fue necesario seleccionar aquellos más relevantes y de los que existe información adecuada para el conjunto del territorio.

- Ligado al hecho de que el análisis propuesto para la resolución del interés minero de los recursos incorporados a la base de datos se planteó a una escala regional y no a un nivel de yacimiento, los indicadores empleados para valorar los parámetros más técnicos perderán cierto grado de exactitud. Por ejemplo, tal y como se comentó en el apartado correspondiente, el modelo desarrollado por Batelaan y De Smedt en 2017 para calcular las tasas de recarga de los acuíferos incorporaba numerosos factores, algunos de carácter muy local, en las fórmulas propuestas. El método de cálculo seguido en esta tesis será mucho más sencillo, empleando la información cartográfica disponible para la Comunidad Autónoma de Aragón. En la misma línea, autores como Lilic et al. (2018), en el estudio de los impactos relacionados con el polvo y el ruido en la práctica minera, consideran otros factores locales además de la existencia de barreras topográficas, como la fuerza y dirección del viento predominante.
- Respecto al estudio de las formaciones geológicas analizadas como potenciales rocas madre de hidrocarburos, cabe destacar que el análisis del contenido en carbono orgánico es un indicador importante pero no decisivo para la definición de una roca como generadora de hidrocarburos, al señalar la cantidad de materia orgánica que contiene la roca, pero no su calidad. Las unidades que muestran unos resultados más prometedores deberán ser sometidas a nuevos análisis que determinen la calidad y madurez de la materia orgánica en ella contenida. También deberán ser tomados en consideración otros factores geológicos del nivel rocoso rico en materia orgánica, como su potencia, su extensión lateral y posibles variaciones en el contenido en carbono orgánico en diferentes puntos de la formación. Además, será necesario analizar otros parámetros relativos a la configuración geológica del entorno, como el reconocimiento de fallas activas que pudieran ser reactivadas por la inyección de fluidos durante el proceso de fractura hidráulica, así como la posición de los acuíferos y de las capas impermeables localizadas entre ellos y la formación geológica explotable mediante esta técnica.

## Capitolo VII (Italiano): Ricapitolazione finale

7.1. Valutazione degli obiettivi

7.2. Linee di applicazione future

7.3. Considerazioni finali

## RICAPITOLAZIONE FINALE

All'inizio della tesi furono pianificati tre obiettivi di base il cui raggiungimento si considerò imprescindibile per dare risposta alle questioni poste in relazione con lo studio del potenziale minerario della regione. Questi obiettivi consistevano, in forma semplificata, nella elaborazione di un inventario aggiornato delle risorse minerarie, energetiche e idriche della regione, nell'analisi dell'interesse minerario dei dati registrati e incorporati nella base di dati considerando diverse dimensioni, la creazione di una piattaforma per la visualizzazione delle informazioni elaborate e dei risultati della tesi, così come la generazione di un sistema adeguato per la esportazione della metodologia a altri contesti geografici. In aggiunta e come parte del progetto incluso in questa tesi e finanziato dall'Istituto Universitario di Investigazione in Scienze Ambientali di Aragón (IUCA) "Le risorse energetiche e lo sviluppo territoriale di Aragón. Analisi e proposte in un nuovo scenario globale.", fu incorporata una finalità aggiuntiva, inclusa come un elemento di speciale interesse fra gli altri obiettivi, consistente nell'analisi del potenziale generatore di idrocarburi di alcune formazioni geologiche che affiorano nella regione.

Nel primo dei tre seguenti paragrafi si valuta il compimento degli obiettivi pianificati all'inizio della tesi, così come i risultati ottenuti. Nel secondo, invece, saranno incluse diverse azioni stabilite come linee d'attuazione una volta finita la tesi. Inoltre si apporteranno, in un terzo paragrafo, alcune brevi considerazioni finali sul lavoro realizzato.

## 7.1. VALUTAZIONE DEGLI OBIETTIVI

Seguendo la sequenza metodologica descritta nella conclusione del Capitolo II della tesi si sono potuti conseguire gli obiettivi indicati all'inizio del lavoro. In questo paragrafo si realizza una valutazione sistematica di quegli obiettivi, analizzando le attività sviluppate per il loro conseguimento e i risultati ottenuti.

**7.1.1. Stabilire una tipologia e una diagnosi attualizzata delle risorse minerarie, energetiche e idriche di Aragón, rivolgendo particolare attenzione a quelle catalogate come critiche dalla UE.**

Per la risoluzione del primo degli obiettivi fissati all'inizio della tesi si decise di realizzare un inventario in forma di base di dati specifica che ospitasse informazioni sullo sfruttamento minerale e idrico attuale e storico, giacimenti e indizi della loro presenza nella Comunità Autonoma di Aragón. I dati di base per l'elaborazione di questo inventario provengono da numerose fonti, tra le quali è incluso il Catasto Minerario, la Carta Geologica della Spagna, vari servizi WMS dell'Istituto Geologico e Minerario della Spagna e varie pubblicazioni scritte. Dato che i dati che costituiscono l'inventario furono ricavati a partire da differenti fonti, realizzate da autori diversi, i metodi per trasferire le informazioni saranno ugualmente variabili. Alcune delle fonti si trovavano già digitalizzate dal punto di vista geografico, che significa con coordinate che ubicavano lo sfruttamento minerario, il giacimento e gli indizi della presenza della risorsa in modo specifico. In altri, invece, l'informazione fornita sulla situazione e le caratteristiche di queste risorse nel territorio aragonese era descritta in formato testuale.

Dato che le fonti consultate per l'ottenimento della informazione erano così diverse, sia nel formato che nel modo di trasmettere i dati, per l'elaborazione della base di dati unificata si dovettero realizzare diverse attività di omogeneizzazione e interpretazione dei dati, includendo la digitalizzazione specifica della informazione quando richiesto, la trasformazione di elementi rappresentati nelle fonti come superfici in entità puntuali, la eliminazione dei dati provenienti da fonti diverse riferiti allo stesso elemento e la unificazione della nomenclatura.

Il risultato parziale del processo di lavoro appena descritto, avviato alla risoluzione del primo degli obiettivi proposti, coincide con la base di dati unificata delle risorse minerarie, energetiche e idriche della Comunità Autonoma di Aragón. Precisamente, la base di dati consta di 5.061 registri che rappresentano sfruttamenti minerari e idrici, diritti minerari, giacimenti e indizi della presenza di risorse minerarie corrispondenti a 101 tipi di risorse diverse. In termini assoluti, il tipo di risorsa con un maggior numero di registri nella base di dati sono le ghiaie (Figura IT.7.1.), con 738, seguite dal carbone (695) e i calcari (455). Gli sfruttamenti attivi al momento della generazione della base di dati erano, esattamente, 266, la maggior parte dedicata all'estrazione di ghiaie (81), argille (37) e calcari (31).

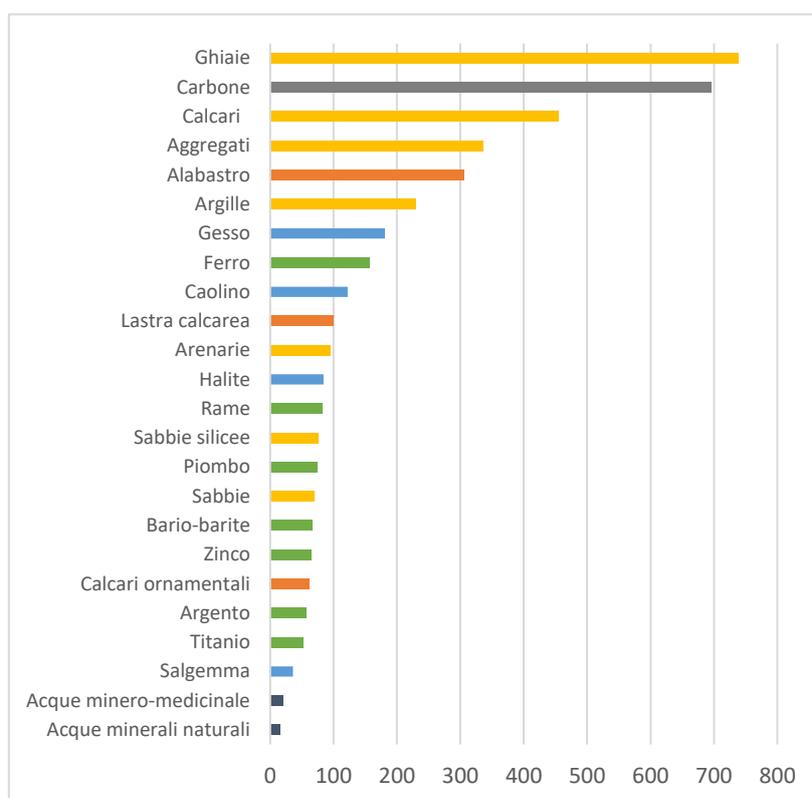


Figura IT.7.1. Numero di registri corrispondenti a sfruttamento, diritti minerari, giacimenti e indizi di risorse minerarie degli elementi più frequenti in ciascuna categoria di risorse. Elaborazione propria.

Per affrontare l'attività di analisi di interesse minerario corrispondente al secondo obiettivo della tesi, queste risorse furono riclassificate in sei diverse categorie: *risorse idriche, rocce industriali, minerali industriali, minerali metallici e risorse energetiche*. Le *rocce industriali* sono, con molta differenza rispetto al resto, quelle che contano con un maggior numero di registri nella base di dati, con più di 2200 punti inventariati (Figura IT.7.2).

Seguono le *risorse energetiche*, i *minerali metallici*, i *minerali industriali*, le *rocce ornamentaali* e, infine, con molta differenza dal resto, le *risorse idriche*.

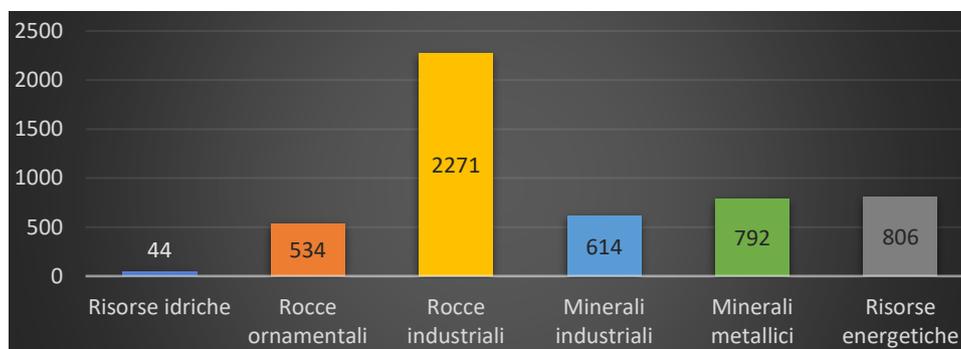


Figura IT.7.2. Numero di registri incorporate nella base di dati per categoria di risorse. Elaborazione propria.

Le rocce industriali sono, ugualmente, quelle che contavano con un maggior numero di sfruttamenti attivi al momento nel quale si realizzò questo inventario, con 198 attività. Con 38, seguono le rocce ornamentali, mentre per il resto delle categorie di risorse il numero di sfruttamenti attivi è in un intervallo compreso tra i 15 minerali industriali e una attività nel caso delle risorse energetiche.

Si fa notare che l'analisi spaziale della base di dati generata permise di osservare una distribuzione dei registri molto disuguale nel territorio aragonese. A livello provinciale, la maggior quantità di dati puntuali raccolti nell'inventario erano localizzati presso Teruel (45%) e Zaragoza (40%). La provincia di Huesca era quella che presentava il minor numero di registri di risorse, con solo 755. D'altra parte, le comarche della D.C. di Zaragoza, di Calatayud e Cuencas Mineras superavano i 300 registri, mentre cinque comarche turolensi, una zaragozana e una oscense presentavano tra 200 e 300 punti inventariati.

D'altra parte, nella bibliografia utilizzata per la realizzazione dell'inventario sono stati localizzati riferimenti relativi a 8 dei 27 elementi catalogati come critici dalla Unione Europea. Concretamente, sono stati inventariati 151 registri corrispondenti ad attività antiche, diritti minerari, e indizi di presenza di antimonio, barite, cobalto, fluorite, fosfati, grafite, magnesio y silice. Quasi la metà dei punti inventariati riferiti a elementi critici si situano nella provincia di Zaragoza, mentre un 42% in quella di Teruel. Huesca conta solo con un 11% del totale.

Per tipo di risorsa, la barite è l'elemento che conta il maggior numero di registri nella base di dati, 67, la gran parte corrispondenti a indizi, seguita dalla fluorite (31), il magnesio (18) e l'antimonio (13).

Nell'attualità non esistono sfruttamenti attivi che estraggano nessuna delle materie prime catalogate come critiche dalla UE, anche se sono state identificate antichi sfruttamenti di tutte le risorse prima nominate, a eccezione di grafite e silice. Inoltre, esistono 8 diritti minerari raccolti nel catasto che potrebbero divenire sfruttamenti attivi in un prossimo futuro. Lo sfruttamento della silice ha determinato la richiesta di quattro di questi diritti minerari, mentre 3 corrispondono alla fluorite e uno alla barite.

Rispetto allo studio di determinate unità geologiche affioranti nel territorio aragonese per l'analisi del loro potenziale come rocce generatrici di idrocarburi, furono raccolti 118 campioni corrispondenti a nove unità geologiche di diversa natura, raccolte in 11 località differenti.

Questi 118 campioni rocciosi presi in campagna furono sottoposti a un processo di macinazione e setacciamento che polverizzasse i campioni per la corretta realizzazione di un'analisi dei carbonati nei laboratori del Dipartimento di Stratigrafia e Sedimentologia della Università di Zaragoza. I 22 campioni che presentavano alcune caratteristiche più interessanti furono inviati a un laboratorio indipendente, concretamente il Servizio di Appoggio alla Investigazione (SAI) della Università di La Coruña, per l'effettuazione di analisi TOC che determinasse il contenuto in materia organica presente nei campioni. Questo valore è fondamentale nella determinazione del potenziale di generazione di idrocarburi della unità geologica. I 22 campioni analizzati, insieme ai risultati ottenuti dalle analisi, furono incorporati come indizi nella base di dati, nella categoria delle risorse energetiche.

#### [7.1.2. Analizzare e valutare il potenziale sfruttamento di queste risorse e l'impatto territoriale prevedibile nell'ipotesi di avviamento d'una attività mineraria ad esse legata](#)

Per il conseguimento di questo obiettivo si decise di avviare un'analisi multifattoriale che include numerosi aspetti relativi all'attività mineraria e al suo impatto ambientale e antropico. Questa analisi si propone di determinare l'interesse minerario che presentano gli

elementi registrati nella base dei dati generata, analizzata nel paragrafo precedente, e che costituisce il risultato principale del processo sviluppato per il compimento del primo obiettivo fissato nella tesi.

Il concetto di interesse minerario sviluppato in questa tesi è in relazione con la definizione di attività mineraria sostenibile pianificato da Oyarzun, Higuera e Lillo (2011) che stabiliscono che, accettando che le miniere modificano l'ambiente naturale e antropico intorno allo sfruttamento, la sostenibilità è il concetto che permette di limitare le modificazioni, in modo che si coprano le necessità umane senza che questo determini la distruzione dell'ambiente interessato. Inoltre coincide con la proposta del Dipartimento dell'Industria, Innovazione e Scienza del Governo australiano, che consiste in uno sfruttamento delle "risorse minerali e energetiche tale da massimizzare i benefici economici e sociali, minimizzando contemporaneamente l'impatto ambientale derivato dalle attività minerarie". In questo modo, l'analisi cerca di dare risposta alla domanda se l'impatto ambientale determinato dallo sfruttamento delle risorse è giustificato dal beneficio ottenuto. Per rispondere a questa domanda è necessario determinare, a sua volta, altre questioni chiave legate alla attività mineraria.

- Il giacimento ha un interesse economico e strategico sufficiente?
- Come si adegua il territorio all'attività mineraria e quale sarà la risposta davanti all'impatto generato dall'attività estrattiva?
- In che intensità saranno modificati dall'attività mineraria i differenti aspetti ambientali e antropici?

Per questo motivo, l'analisi multifattoriale proposta si struttura in tre dimensioni fondamentalmente chiamate, rispettivamente, *Profilo geologico*, *Caratteristiche del terreno* e *Inserimento socioeconomico*.

Ognuna di queste dimensioni è formata da una serie di indicatori relativi ai corpi mineralizzati, alle caratteristiche dei prodotti sfruttabili, alla peculiarità del territorio dove sono localizzati, alle interazioni che si stabiliranno fra la potenziale attività mineraria e gli elementi situati al suo intorno. Come già commentato nel paragrafo precedente, relativo alla risoluzione del primo obiettivo fissato, le differenti risorse presenti nel territorio furono

riclassificate in una serie di categorie, con l'obiettivo di individuare l'analisi di interesse minerario proposta. In questo modo, il peso attribuito a ciascun indicatore nel risultato finale sarà differente secondo la categoria di risorse considerate. Inoltre, non tutti i gruppi vanno a essere valutati con gli stessi indicatori, in quanto alcuni di questi non sono applicabili a determinate categorie, mentre altri sono stati pianificati, esclusivamente, per alcuni di questi gruppi di risorse.

Concretamente, nella valutazione della prima dimensione, *Profilo geologico*, furono considerati 5 indicatori differenti, relativi alle particolarità del giacimento o corpo mineralizzato e alla caratteristica di criticità per l'economia europea del prodotto sfruttabile. Per questioni tecniche, il gruppo delle *risorse idriche* fu valutato solo secondo il suo stato di attività, in quanto gli altri indicatori non sono applicabili. Per altro, il gruppo delle risorse chiamate in questa tesi con il nome *idrocarburi non convenzionali*, fu incluso un criterio aggiuntivo, relativo ai risultati ottenuti nelle analisi *TOC*.

Tutte le categorie di risorse che costituiscono l'inventario furono realizzate attraverso tre indicatori diversi nella dimensione caratteristiche del terreno. Due di questi, quelli relativi alla generazione e diffusione del drenaggio acido di miniera e alla vulnerabilità davanti a eventi naturali eccezionali, sono particolarmente complessi e risultano dalla combinazione ponderata di numerosi fattori. Così, per esempio, l'indicatore riferito ai rischi naturali adegua l'informazione alle mappe di rischio di sei processi naturali diversi, il cui peso relativo nell'indicatore finale sarà condizionato dalla sua capacità distruttiva e dalla frequenza relativa nel contesto territoriale aragonese. Per quanto riguarda il gruppo delle risorse idriche fu analizzato mediante indicatori aggiuntivi, relativamente alla capacità di ricarica degli acquiferi, che comprende fattori come piovosità media annuale e permeabilità del substrato.

Per la valutazione della dimensione *Inserimento socioeconomico* furono inclusi sette indicatori, comuni per tutti i gruppi di risorse analizzati, sebbene il modo di valutare i registri compresi nel gruppo delle risorse idriche sarà leggermente diverso per la caratteristica di rinnovabilità dell'acqua. In tal modo, si assegnò un peso relativo superiore all'indicatore che valuta l'impatto potenziale nell'economia locale, in cambio della riduzione del fattore di

impatto all'uomo, al paesaggio e alla copertura vegetale, considerevolmente meno importante in questo tipo di estrazione.

Come risultato dell'analisi appena descritta, si ottiene un valore unico di interesse minerario, che combina i risultati derivati dalle tre domande proposte relative all'interesse economico e strategico del giacimento, all'adeguazione del territorio per l'attività mineraria e all'impatto ambientale e antropico. È importante ricordare che i risultati dell'analisi servono per comparare i registri inclusi nella base di dati fra loro nel contesto territoriale aragonese, tenuto conto che gli intervalli numerici stabiliti per determinare l'appartenenza a una o l'altra categoria si stabiliranno in funzione dei risultati globali ottenuti. Inoltre la categorizzazione degli indicatori impiegati nell'analisi fu stabilita considerando le particolarità della Comunità Autonoma di Aragón.

Il gruppo delle risorse idriche fu quello che ottenne una valutazione globale più positiva nell'analisi effettuata, dato che quasi il 50% dei registri corrispondenti a questo tipo di risorsa fu incluso tra quelli di alto interesse. Seguono le rocce ornamentali, con un 40% e le rocce industriali con quasi il 30%. Questo stesso gruppo di risorse, subito dopo quello formato da minerali metallici (45%), è quello che presenta un maggior numero di registri catalogati come di basso interesse, con un 39% del totale. La percentuale di elementi di basso interesse supera il 30% anche nei gruppi corrispondenti ai minerali industriali e risorse energetiche.

Secondo lo stato di attività nel quale si incontrano gli elementi registrati nella base di dati, i giacimenti che sono in attività di sfruttamento al momento attuale presentano una valutazione globale più positiva, dato che il 72% del totale appartiene al gruppo di interesse maggiore, contro solo un 28% di elementi di basso interesse. Questi risultati si invertono nel gruppo degli indizi, dove un 55% fu incluso nella categoria di basso interesse.

Considerando tutti i registri inventariati nella base di dati, indipendentemente dalla loro categoria o stato di attività, quelli di basso interesse risultarono i più numerosi (38%), seguiti da vicino da quelli di alto interesse (30%). Inoltre, un 1% dei registri si situavano nell'area che potrebbe considerarsi di spiccato interesse per motivi medio ambientali o economici,

interagendo con una ubicazione nella quale si stanno sviluppando attività economiche più redditizie o il cui investimento anticipato giustifichi un mantenimento nel tempo.

I risultati ottenuti con l'analisi di interesse minerario per le risorse catalogate come critiche dalla Commissione Europea furono, nell'insieme, molto più positivi che i risultati globali. Non a caso, più del 50% dei registri corrispondenti a risorse critiche furono classificati come di interesse alto, contro un solo 18% di basso interesse. Considerando le risorse in forma individuale, elementi come l'antimonio (85%), il magnesio (74%) o la barite (55%), superavano la percentuale media di registri catalogati come alti.

Come si disse all'inizio di questo paragrafo, la valutazione di interesse minerario delle formazioni geologiche con potenziale di generazione di idrocarburi fu stimata impiegando un indicatore che corrisponde ai risultati dell'analisi del contenuto in carbonio organico (analisi *TOC*). Secondo le stime stabilite da McCarthy (2011), che mettono in relazione la percentuale di carbonio organico con la qualità come rocce generatrici di idrocarburi, dei 22 campioni analizzati, uno realizzò una eccellente valutazione, 5 entrarono nella categoria buona, 8 nella discreta, 7 nella povera e una non presentava nessuna percentuale. Includendo le altre dimensioni dell'analisi, relazionate con il territorio dove è situato, un 32% dei registri inclusi nella categoria di *idrocarburi non convenzionali* fu catalogato di interesse alto, contro un 45% dei registri che furono inclusi nella classe di basso interesse.

### 7.1.3. Generare il pacchetto di strumenti adeguato per la traslazione della metodologia di analisi proposta ad altri territori, minimizzando i tempi di lavoro, e creare una piattaforma di visualizzazione che permetta diffondere i risultati del lavoro

Per conseguire la prima parte di questo obiettivo, relazionato con la creazione di un pacchetto di strumenti che permetta di trasferire la metodologia di analisi impiegata a altri contesti territoriali, fu fondamentale lo strumento di analisi incluso nell'ambito di *ArcGIS* conosciuto come *Model Builder*. Questo strumento permette la elaborazione di modelli complessi composti da vari *geoprocessing* interconnessi. Inoltre la possibilità di incorporare *reiteratori*, cioè, elementi che permettono la ripetizione diverse volte di uno stesso *geoprocessing*, facilitò la automazione di diverse analisi, risparmiando una quantità di tempo considerevole.

Utilizzando *Model Builder* furono creati numerosi modelli di analisi. Concretamente, si generò uno strumento differente per ciascuno degli indicatori proposti nell'analisi e, inoltre, variazioni di questi modelli quando la diversa forma di valutazione di un indicatore per le distinte categorie di risorse lo richiedesse. Allo stesso modo, furono generati diversi strumenti per risolvere le categorie di interesse alle quali appartiene ogni risorsa in ciascuna delle dimensioni studiate, altre per la risoluzione della valutazione di interesse finale atteso per la categoria considerata e, infine, un modello per stabilire la simbologia adatta per la rappresentazione cartografica.

È importante segnalare che gli strumenti generati permettono la modificazione dei dati di ingresso, incluso il *layer* che ospita l'informazione delle risorse nel territorio, i dati cartografici ausiliari e i parametri numerici utilizzati nelle analisi con l'obiettivo di adeguarli alle peculiarità del nuovo contesto geografico. Per altro, si fa notare che il modello generato per le analisi delle risorse minerali di Aragón è flessibile e consentirebbe di essere modificato secondo criteri desiderati dagli interessati.

È opportuno notare che la metodologia di analisi impiegata per la valutazione delle risorse minerali, energetiche e idriche di Aragón non è stata finora utilizzata in altri territori, pertanto non si è potuto verificare la funzionalità degli strumenti in altri contesti geografici. Ciò nonostante, durante la pratica dottorale nel *Laboratorio di Analisi e Rappresentazione Territoriale e Urbane*, LARTU del Politecnico di Torino, ebbi l'opportunità di lavorare, grazie alle Dott.sse Taddia e Bottero e al Dott. Lo Russo, nella elaborazione della mappa delle cave del Piemonte (Figura IT.7.3) incluso nel *Piano Regionale delle Attività Estrattive, PRAE*. In questo progetto fu possibile sperimentare variazioni nella metodologia utilizzata per la acquisizione di dati e generare una nuova base di dati relativa alle risorse minerali in un contesto territoriale tanto differente da quello aragonese. Per quel lavoro fu necessario realizzare un processo di ricerca e acquisizione di informazioni relative alle risorse di quella regione italiana e adattare le caratteristiche della base di dati alle necessità specifiche del progetto, evidenziando solamente i materiali estratti in cave. Le risorse incorporate a quell'inventario corrispondono alle categorie denominate nella tesi *rocce industriali, minerali industriali e rocce ornamentali*. Inoltre, le cave inventariate furono differenziate secondo lo

stato di attività e inattività e queste ultime, a loro volta, divise in funzione della avvenuta o meno restaurazione.

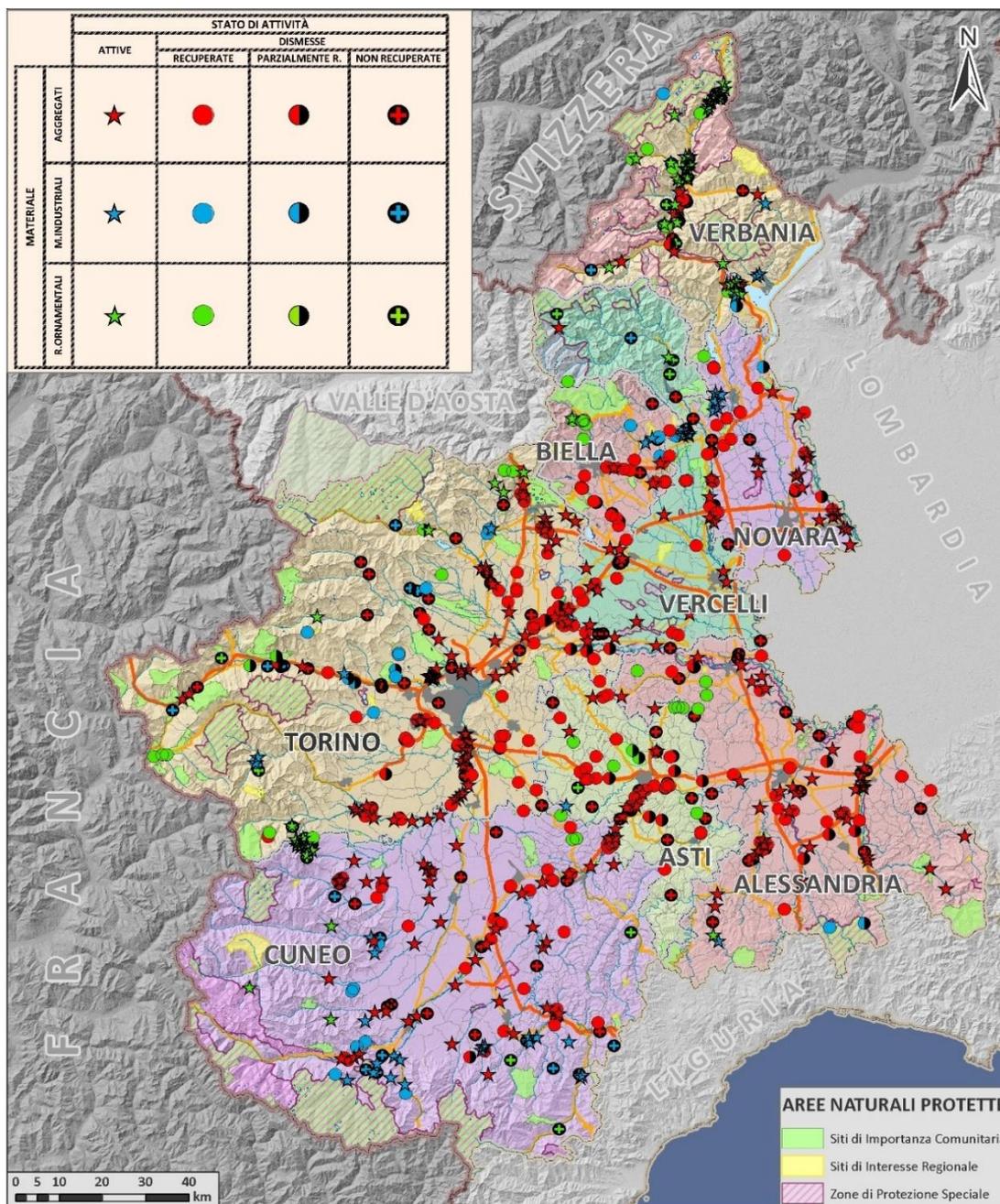


Figura IT.7.3. Carta delle cave della Regione Piemonte. Elaborazione propria.

Per il compimento della seconda parte di questo obiettivo, relativo alla creazione di una piattaforma di diffusione, visualizzazione e consulta di risultati ottenuti da tutto il processo di lavoro, si decise di generare un'applicazione web dotata di interattività. Questa

applicazione fu generata mediante la *utility* denominata *Web AppBuilder*, inclusa nell'ambiente *ArcGIS*.

Oltre alle informazioni relative alla base di dati delle risorse minerali e dei risultati delle analisi alle quali furono sottoposte talirisorse, l'applicazione include numerosi strumenti destinati all'interazione dell'utente con le informazioni ospitate. Alcuni di questi strumenti permetteranno di calcolare le zone direttamente esposte ai lavori di strazione registrati, localizzare i giacimenti più vicini a un determinato centro abitato o ottenere statistiche immediate sulla distribuzione delle risorse nel territorio.

## 7.2. LINEE DI APPICAZIONE FUTURE

I risultati derivati dal procedimento dal lavoro iniziato al raggiungimento degli obiettivi pianificati al cominciare la tesi e che si trovano per esteso tanto in questo testo quanto nella applicazione web generata per la visualizzazione dei dati e nel pacchetto di strumenti creato per l'esportazione della metodologia seguita ad altri contesti territoriali, possono convertirsi in uno strumento utile per le autorità politiche a livello locale e regionale, così come per le imprese del settore minerario. Le informazioni contenute in questo lavoro possono aiutare nella scelta di decisioni di carattere ambientale, strategico e economico in relazione con le risorse minerali aragonesi, perseguendo forme di attuazione più sostenibili e effettive in relazione alle materie prime e i depositi minerali, così come assicurare gli agganci ottimali tra la pianificazione territoriale e la garanzia nella salvaguardia dei depositi minerali più interessanti, con l'obiettivo di assicurare l'accesso attuale e futuro agli stessi.

Coscienti di tutto questo, una volta completato il processo di lavoro e conseguito gli obiettivi indicati all'inizio dello stesso, si giudicò necessaria la futura pianificazione delle seguenti azioni indirizzate alla promozione e diffusione delle informazioni raccolte tra le autorità competenti e gli attori implicati nella scelta di decisioni nel settore minerario.

1. Trasferimento alle istituzioni e agenzie sociali pertinenti delle conclusioni ottenute.
2. Pubblicazione dei risultati definitivi ottenuti

3. Valutazione delle opportunità o la prosecuzione dell'investigazione in questo campo, così come la possibilità di ripetere lo studio in altri contesti territoriali.

### 7.3. CONSIDERAZIONI FINALI

Come conclusione di questa tesi saranno esposte una serie di considerazioni finali relative alle peculiarità del lavoro svolto

- L'esplorazione mineraria è un'attività dinamica nella quale, occasionalmente, le imprese decidono di concludere il lavoro estrattivo o, al contrario, alcuni dei diritti minerari raccolti nel catasto evolvono sino all'apertura di una nuova miniera o cava, mentre altri sono definitivamente abbandonati. Per altro, anche i criteri impiegati nelle analisi evolvono nel tempo: i centri abitati possono crescere o vedere ridotte il numero di abitanti, è possibile che migliorino e si costruiscano nuove infrastrutture, o si chiudano altre, gli usi ai quali si destina ogni porzione di territorio variano, l'amministrazione può proporre uno spazio con meritevole di essere conservato per le sue caratteristiche ambientali, culturali, etc. Il lavoro presentato in questa tesi presuppone una fotografia della situazione e del suo contesto geografico in un intervallo di tempo compreso tra gli anni 2015 y 2019, pertanto, per mantenere la sua validità, dovrà essere sottoposto a revisione periodica.
- Come si è potuto dimostrare sino al momento, l'azione mineraria è un tema complesso nel quale intervengono numerosi fattori di natura molto diversa: geologica, geopolitica, ambientale, socioeconomica... Nello studio della variabilità mineraria sono analizzati diversi fattori legati al giacimento e al suo intorno, all'impatto ambientale e alla restaurazione dei terreni, alla congiuntura economica e alla tecnologia e meccanica necessaria per poter sviluppare lo sfruttamento e trarre beneficio dal minerale. Esistono più fattori di quelli utilizzati nell'analisi realizzata in questa tesi, nonostante questo, è da notare che studi di efficacia economica sono specifici per ogni sfruttamento minerario e non in un contesto regionale, pertanto fu necessario selezionare quello che era più rilevante e del quale esiste una informazione adeguata per il contesto territoriale.

- Legato al fatto che l'analisi proposta per la risoluzione dell'interesse minerario delle risorse incluse nella base di dati si fissò a scala regionale e non a livello di giacimento, gli indicatori impiegati per valutare i parametri più tecnici perderanno un certo grado di esattezza. Per esempio, così come si commentò nel paragrafo corrispondente, il modello sviluppato da Batelaan y De Smedt nel 2017 per calcolare il tasso di ricarica degli acquiferi includeva numerosi fattori, alcuni di carattere molto locale, nelle formule proposte. Il metodo di calcolo seguito in questa tesi sarà molto più semplice, utilizzando l'informazione cartografica disponibile della Comunità Autonoma de Aragón. Sulla stessa linea, autori come Lilic et al. (2018), nello studio degli impatti relazionati con la polvere e il rumore nella pratica mineraria, considerano altri fattori locali oltre all'esistenza di barriere topografiche, come la forza e direzione del vento dominante.
- Rispetto allo studio delle formazioni geologiche analizzate come potenziale roccia madre di idrocarburi, è importante notare che le analisi del contenuto in carbonio organico indicatore importante ma non decisivo per la definizione di una roccia come generatrice di idrocarburi, in quanto indica la quantità di materia organica contenuta nella roccia, ma non la sua qualità. Le unità che mostrano risultati più promettenti, dovrebbero essere sottoposte a nuove analisi che determinino la qualità e maturità della materia organica in esse contenuta. Dovrebbero essere presi in considerazione anche altri fattori geologici del livello roccioso con materia organica, come la sua potenza e estensione laterale e possibili variazioni nel contenuto in carbonio organico della formazione. Inoltre sarà necessario analizzare altri parametri relativi alla configurazione geologica dell'intorno, come il riconoscimento di faglie attive che potrebbero essere riattivate con iniezione di fluidi durante il processo di frattura idraulica così come la posizione degli acquiferi e delle superfici permeabili localizzate fra essi e la formazione geologica sfruttabile mediante questa tecnica.

Anexo I: Cartografía sistemática de los  
indicadores espaciales del análisis para una  
evaluación del interés de explotación de los  
recursos mineros de Aragón

## CARTOGRAFÍA SISTEMÁTICA DE LOS INDICADORES ESPACIALES DEL ANÁLISIS PARA UNA EVALUACIÓN DEL INTERÉS DE EXPLOTACIÓN DE LOS RECURSOS MINEROS DE ARAGÓN

Al contrario de lo que sucede con los indicadores propuestos para la primera de las dimensiones establecidas en el análisis, a la que fue asignada el nombre genérico de *Perfil geológico*, y que valora aspectos propios de cada yacimiento inventariado o del recurso que en él puede ser explotado, las otras dos dimensiones están compuestas por indicadores que estudian los factores del territorio donde se ubica el yacimiento y las relaciones con los elementos en él localizados. Es por este motivo, junto con la posible existencia de recursos que todavía no han sido descubiertos y que podrían localizarse en cualquier punto de la región aragonesa, por lo que se ha considerado interesante analizar el comportamiento del territorio en su conjunto ante potenciales actividades mineras, siguiendo los criterios establecidos para la valoración de los puntos inventariados, explicados en el cuarto capítulo de la tesis.

Algunos de los indicadores que analizan el territorio lo compartmentan de forma continua, fraccionándolo en una serie de categorías en función de sus características, mientras que otros emplean indicadores más o menos complejos que valoran el entorno en el que se localiza cada uno de los puntos inventariados. Evaluar el territorio en el caso de los primeros será sumamente sencillo, ya que este fue ya compartimentado en categorías durante el proceso de análisis de los puntos que componen la base de datos de recursos mineros y aguas de Aragón. En el caso de los indicadores que fueron calculados a partir de índices, esta valoración no fue tan sencilla, siendo necesaria la ejecución de análisis geoestadísticos que interpolasen los datos disponibles, es decir, los puntos inventariados más algunos puntos extras generados en las áreas en las que no existieran yacimientos ni indicios minerales, con el fin de predecir los valores que adoptaría cada localización del terreno ubicada entre ellos.

La presentación de esta cartografía comenzará con la introducción de los resultados conjuntos obtenidos por las dos dimensiones analizadas. La combinación de las capas que contienen los resultados parciales obtenidos para cada una de las dos dimensiones encargadas de valorar el comportamiento del territorio y lo que sobre él se sustenta permitirá predecir el resultado de interés final en función de la catalogación recibida en la tercera dimensión (*Perfil geológico*), que es exclusivamente dependiente de las propiedades del yacimiento y del elemento, o elementos, en él explotados. De este modo, si una porción del territorio ha sido clasificada como de interés bajo en las dimensiones *Inserción socioeconómica* y *Aptitud del terreno*, un yacimiento localizado sobre esa extensión obtendrá un resultado negativo de interés final independientemente del valor otorgado en la tercera dimensión, la referente al *perfil geológico*. Del mismo modo, si una parcela fuera clasificada como de interés alto en las dos dimensiones que valoran el territorio, un yacimiento localizado sobre ella será asignado a esa misma categoría en el análisis final de interés. Si la parcela ha recibido una valoración diferente en las dos dimensiones territoriales analizadas, o si ambas han sido catalogadas como de interés medio, el valor de interés final dependerá del resultado obtenido para el *Perfil geológico*.

El mapa que muestra la combinación de los resultados parciales de estas dos dimensiones (Mapa 1), presenta tres modalidades diversas, en función de los recursos analizados. Así, el mapa A es el correspondiente a los recursos energéticos y los minerales metálicos, el mapa B analiza las rocas y minerales industriales y las rocas ornamentales, mientras que el mapa C es el encargado de estudiar el caso de las aguas. Esta nomenclatura empleada para hacer

referencia a los distintos grupos de recursos se mantendrá a lo largo de todo el anexo, de modo que si en el nombre del mapa aparece una de estas letras, hará referencia a un grupo de recursos concreto.

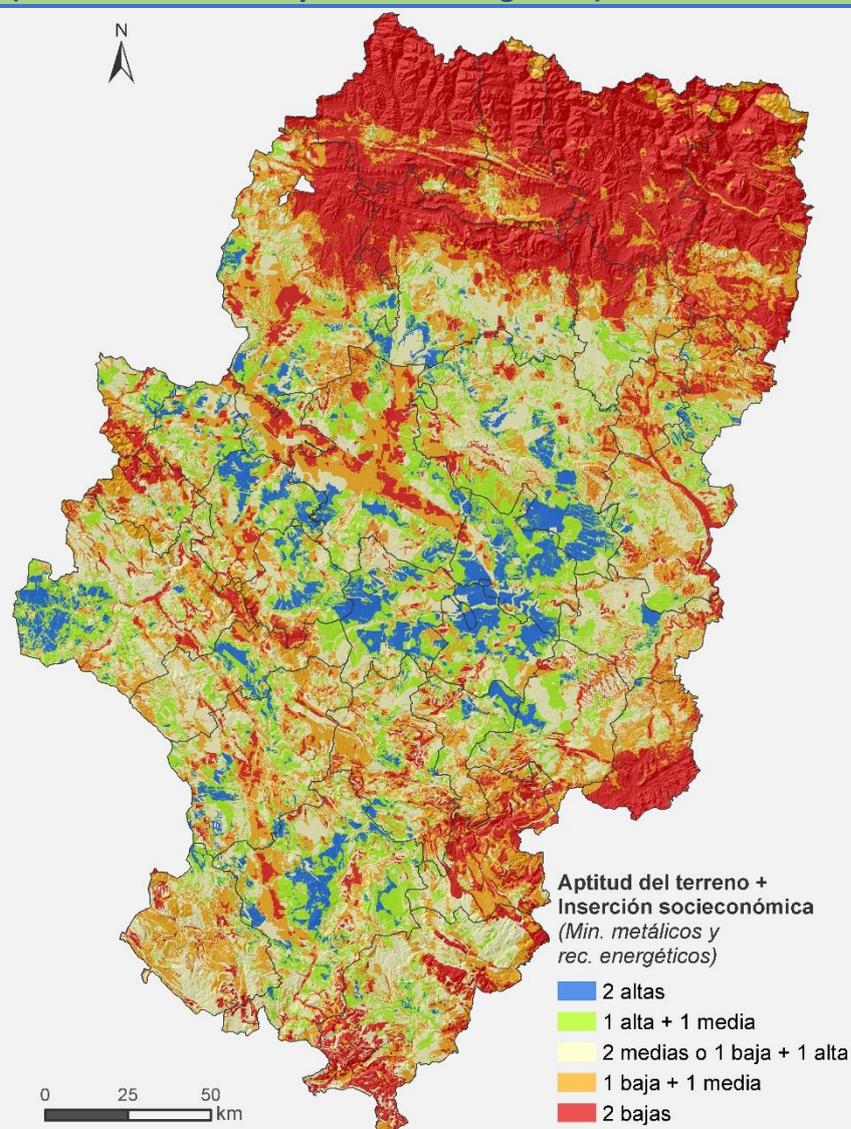
En las diferentes versiones de los mapas 2 y 3 se presentan los resultados parciales obtenidos por cada categoría de recursos en las dimensiones *Aptitud del terreno* e *Inserción socioeconómica*. Estos mapas proceden del cruce de la información relativa a los indicadores que configuran cada una de las dos dimensiones, ponderada en función del peso asignado a estos indicadores.

Finalmente se incluirán numerosos mapas que subdividen el territorio en diferentes parcelas correspondientes a las categorías establecidas en cada uno de los indicadores empleados en el análisis. En el indicador referente al acceso a las infraestructuras se ha incluido cartografía referente a cada uno de los elementos considerados en el análisis (transporte, agua, electricidad y combustible).

A continuación serán listados todos los mapas que componen este anexo. El primer subnivel se corresponde con los mapas resultantes de la combinación de las dos dimensiones que analizan el territorio. El segundo mostrará los resultados parciales de estas dos dimensiones, mientras que el tercero expondrá la cartografía referente a los indicadores que componen dichas dimensiones. Existe un cuarto subnivel en el que se incluyen los mapas relacionados con los elementos considerados en el análisis del indicador *Acceso a las infraestructuras*.

- MAPA 1 (A, B y C). RESULTADOS CONJUNTOS DE LAS DIMENSIONES APTITUD DEL TERRENO E INSERCIÓN SOCIOECONÓMICA
  - MAPA 2 (A, B y C). RESULTADOS PARCIALES PARA LA DIMENSIÓN APTITUD DEL TERRENO
    - MAPA AT1. INDICADOR: ÍNDICE DE ADECUACIÓN TOPOGRÁFICA
    - MAPA AT2. INDICADOR: CAPACIDAD DE RECARGA DE LOS ACUÍFEROS
    - MAPA AT3 (A y BC). INDICADOR: GENERACIÓN Y DIFUSIÓN DEL DAM Y OTROS TIPOS DE CONTAMINANTES
    - MAPA AT4. INDICADOR: VULNERABILIDAD FRENTE A EVENTOS NATURALES EXTREMOS
  - MAPA 3 (AB y C). RESULTADOS PARCIALES PARA LA DIMENSIÓN INSERCIÓN SOCIOECONÓMICA
    - MAPA IS1. INDICADOR: RÉGIMEN DE PROPIEDAD DEL TERRENO
    - MAPA IS2. INDICADOR: ACCESO A LAS INFRAESTRUCTURAS
      - MAPA IS2.1. ACCESO AL TRANSPORTE
      - MAPA IS2.2. ACCESO AL AGUA
      - MAPA IS2.3. ACCESO A LA ELECTRICIDAD
      - MAPA IS2.4. ACCESO AL COMBUSTIBLE
    - MAPA IS3 (AB y C) IMPACTO POTENCIAL EN LA ECONOMÍA LOCAL
    - MAPA IS4. NIVEL DE EXPOSICIÓN DE LOS NÚCLEOS DE POBLACIÓN
    - MAPA IS5. AFECTACIONES DE LOS BOSQUES Y DE LA CUBIERTA VEGETAL
    - MAPA IS6. RESTRICCIONES POR FIGURAS DE PROTECCIÓN
    - MAPA IS7. AFECTACIONES DEL PAISAJE

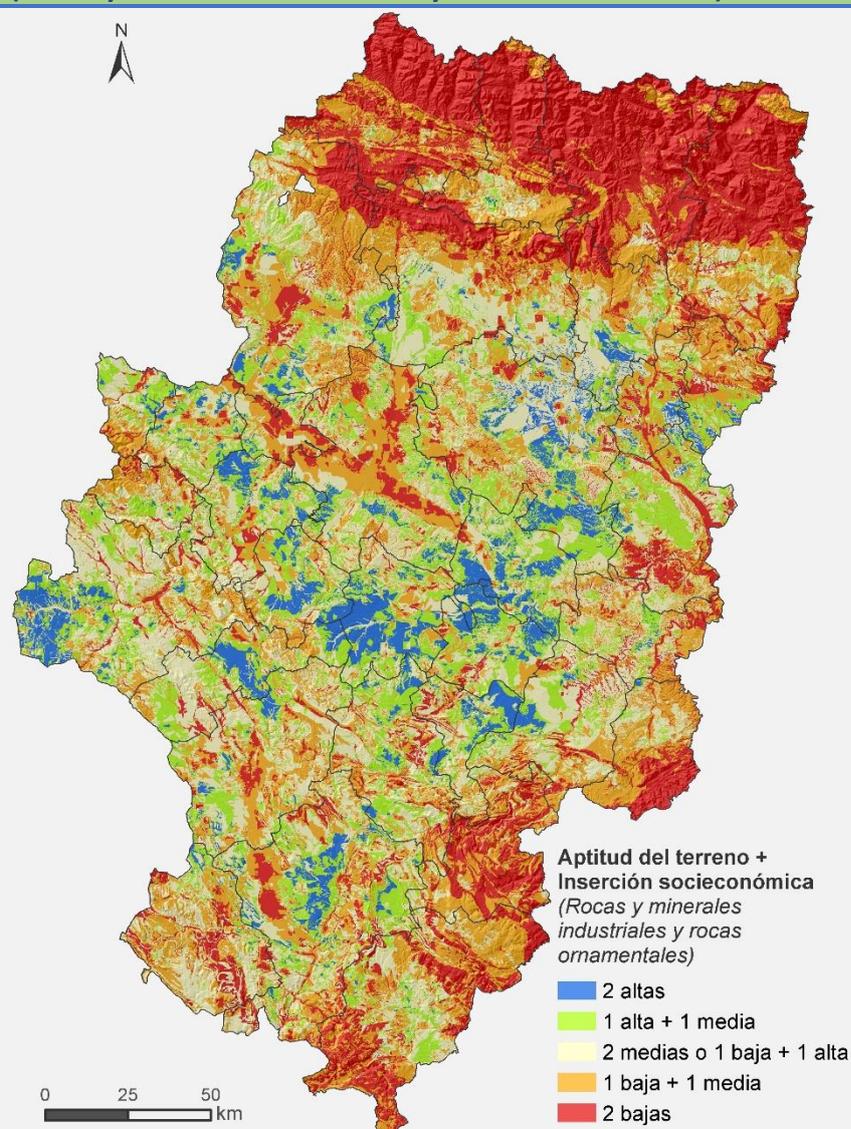
## MAPA 1.A. RESULTADOS CONJUNTOS DE LAS DIMENSIONES APTITUD DEL TERRENO E INSERCIÓN SOCIOECONÓMICA (Minerales metálicos y recursos energéticos)



- Mapa resultante de la combinación de los resultados parciales para las dos dimensiones relacionadas con el territorio (Mapa 2.A. y Mapa 3.AB.)
- Categorías de recursos: minerales metálicos y recursos energéticos.

- Amplias extensiones del territorio calificadas como de interés bajo para ambas dimensiones. Cualquier elemento localizado sobre ellas habrá recibido una valoración negativa en el análisis de interés efectuado. Se localizan, principalmente, en el norte de la comunidad, entre las Sierras Exteriores y la frontera con Francia. También son frecuentes en las comarcas montañosas del margen oriental turolense.
- Los territorios en los que las dos dimensiones han recibido una valoración máxima son muy escasos y están limitados a pequeñas parcelas localizadas en la depresión del Ebro, el valle del río Alfambra y el margen occidental de la Comunidad de Calatayud.

## MAPA 1.B. RESULTADOS CONJUNTOS DE LAS DIMENSIONES APTITUD DEL TERRENO E INSERCIÓN SOCIOECONÓMICA (Rocas y minerales industriales y rocas ornamentales)

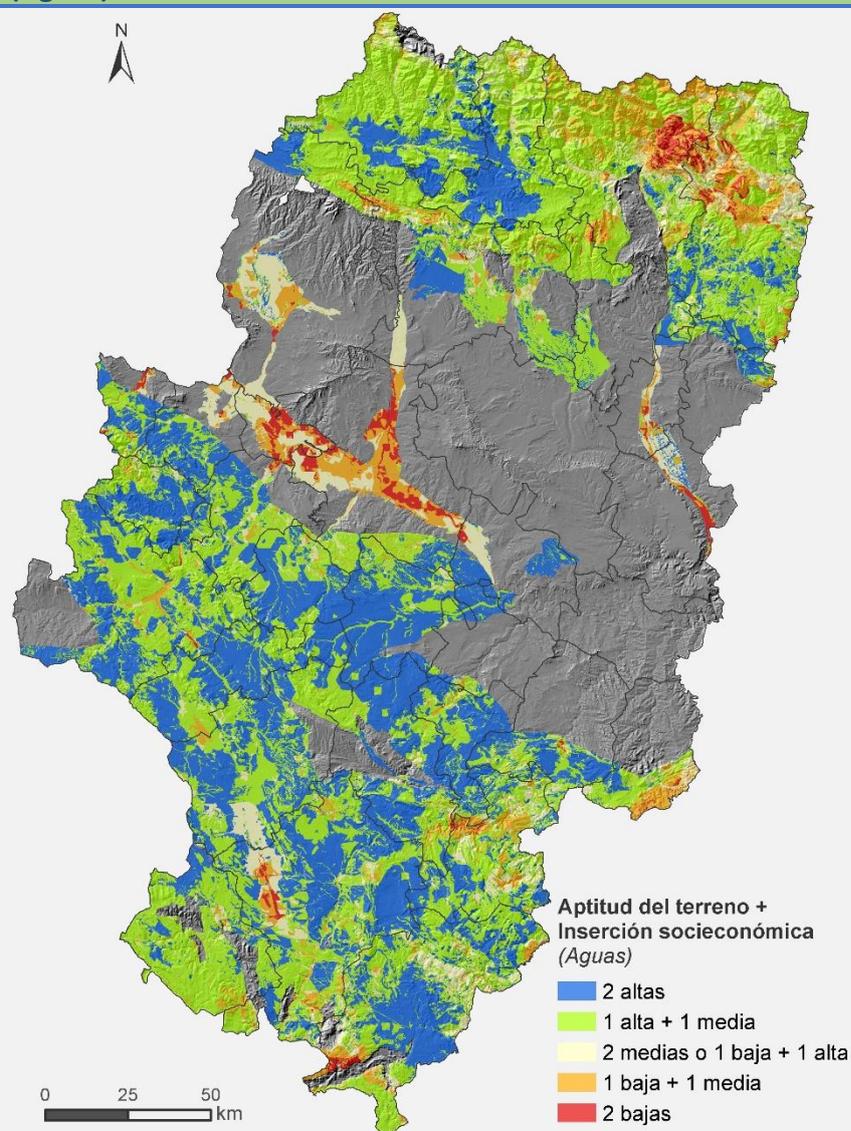


- Mapa resultante de la combinación de los resultados parciales para las dos dimensiones relacionadas con el territorio (Mapa 2.B. y Mapa 3.AB.)
- Categorías de recursos: rocas y minerales industriales y rocas ornamentales.

- No existen grandes variaciones en la distribución de las diferentes categorías si se compara con el Mapa 1.A.
- No obstante, se observa una clara reducción de las áreas en las que las dos dimensiones han sido catalogadas como de interés bajo, especialmente en toda la franja pirenaica y en las sierras turolenses orientales.
- Las zonas de interés alto en ambas dimensiones, sobre todo las localizadas en el centro de la comunidad, también pierden continuidad.

## MAPA 1.C. RESULTADOS CONJUNTOS DE LAS DIMENSIONES APTITUD DEL TERRENO E INSERCIÓN SOCIOECONÓMICA

(Aguas)

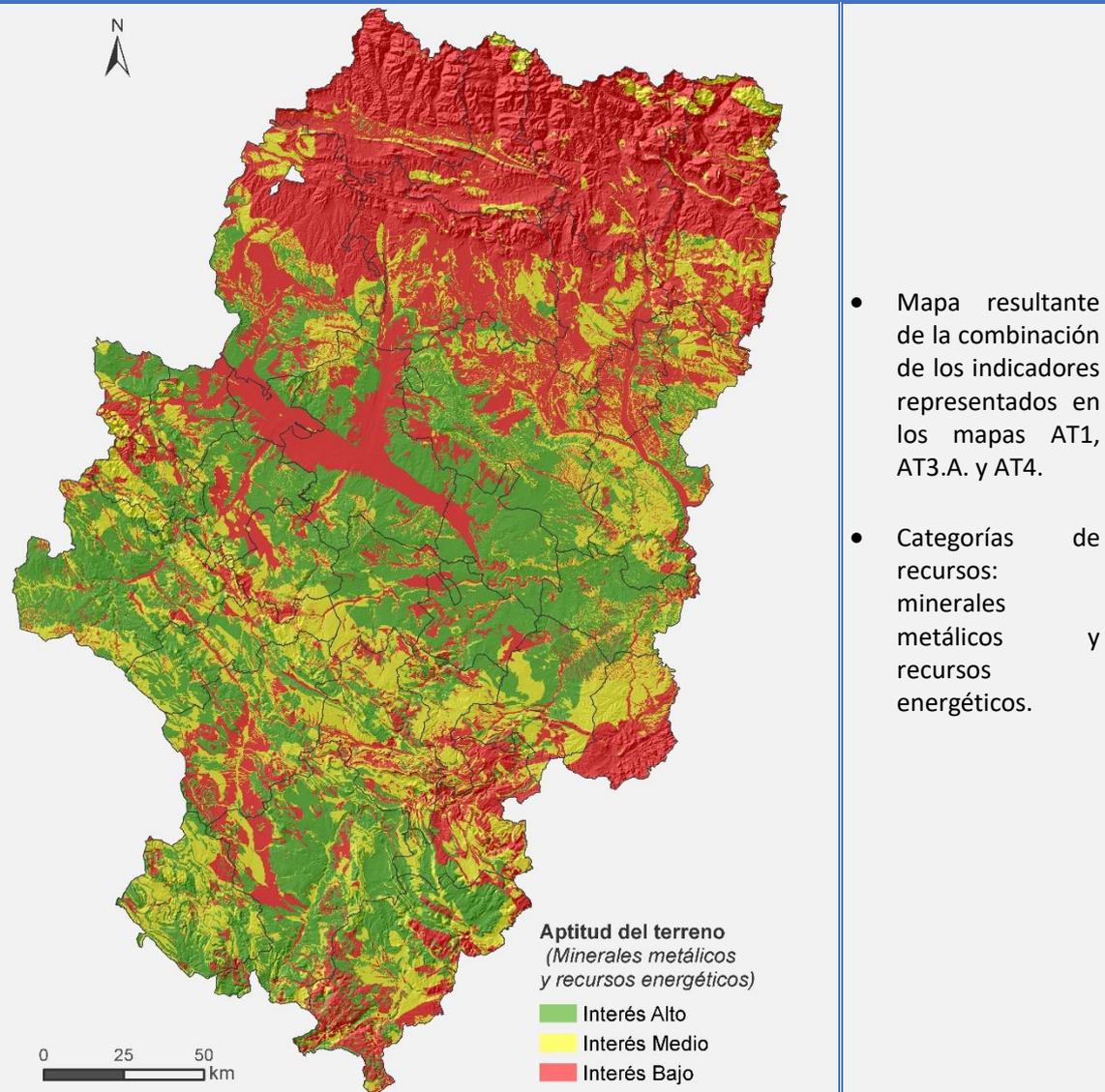


- Mapa resultante de la combinación de los resultados parciales para las dos dimensiones relacionadas con el territorio. (Mapa 2.C. y Mapa 3.C.)
- Categorías de recursos: aguas.
- Resultados disponibles para la extensión de las masas de agua subterráneas.

- En general, dominan las parcelas catalogadas de interés alto en las dos dimensiones, o alta en una y media en la otra. Estas se localizan principalmente en la Cordillera Ibérica, tanto en la provincia de Teruel como en la de Zaragoza, así como en buena parte de los Pirineos.
- En los Pirineos, los territorios que han recibido una calificación positiva en ambas dimensiones se encuentran reducidos a una pequeña extensión coincidente con la depresión intrapirenaica y el curso alto del río Gallego en el valle de Tena.
- En los acuíferos localizados en el valle del Ebro o en el somontano pirenaico los resultados no son tan positivos.

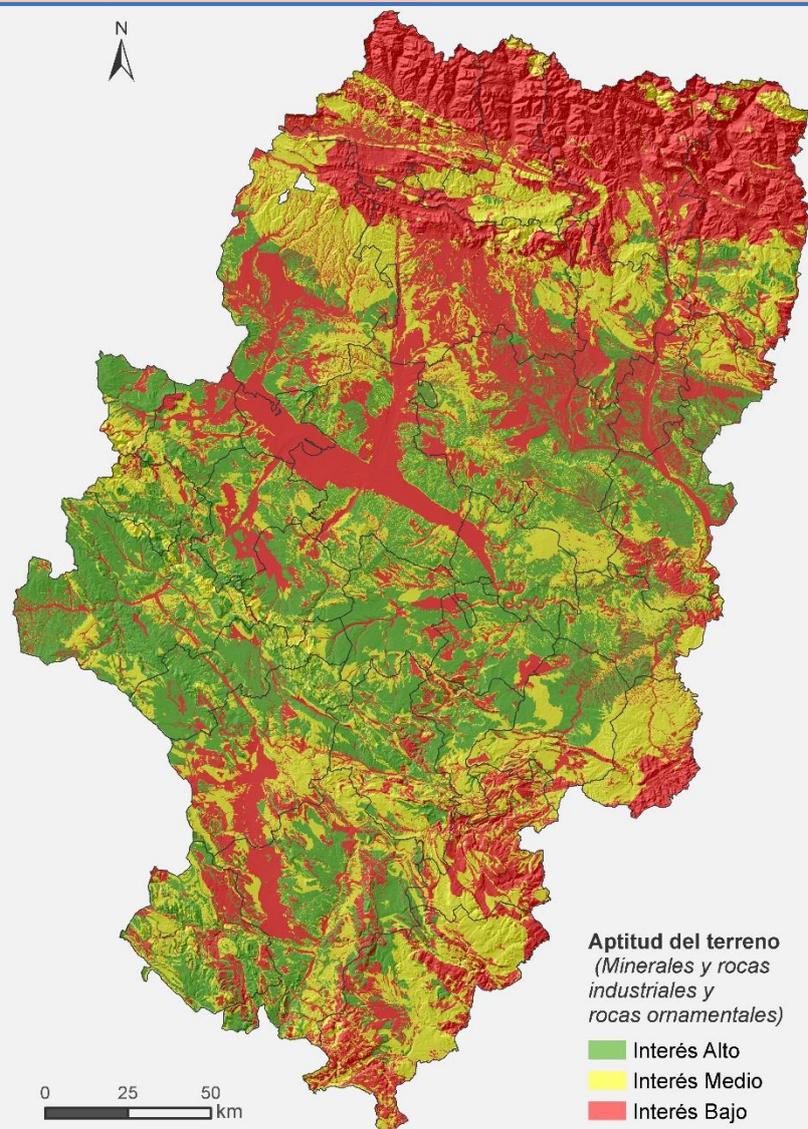
## MAPA 2.A. RESULTADOS PARCIALES PARA LA DIMENSIÓN *APTITUD DEL TERRENO*

(Recursos energéticos y minerales metálicos)



- Mapa resultante de la combinación de los indicadores representados en los mapas AT1, AT3.A. y AT4.
- Categorías de recursos: minerales metálicos y recursos energéticos.

- Clara concentración de la categoría de interés bajo en todo el norte de la comunidad (Pirineos, Sierras Exteriores y buena parte del somontano oscense). También en las sierras situadas en el área oriental de la provincia de Teruel.
- Debido al riesgo de sufrir daños por diversos tipos de riesgos naturales, todo el valle alto del Ebro y gran parte de la depresión del Jiloca estarán englobados dentro de la clase de interés bajo.
- La categoría de interés alto es la predominante en aquellas zonas de la depresión del Ebro en el que el riesgo de inundaciones es bajo, así como en la comarca de la Comunidad de Teruel y en la Ibérica zaragozana.

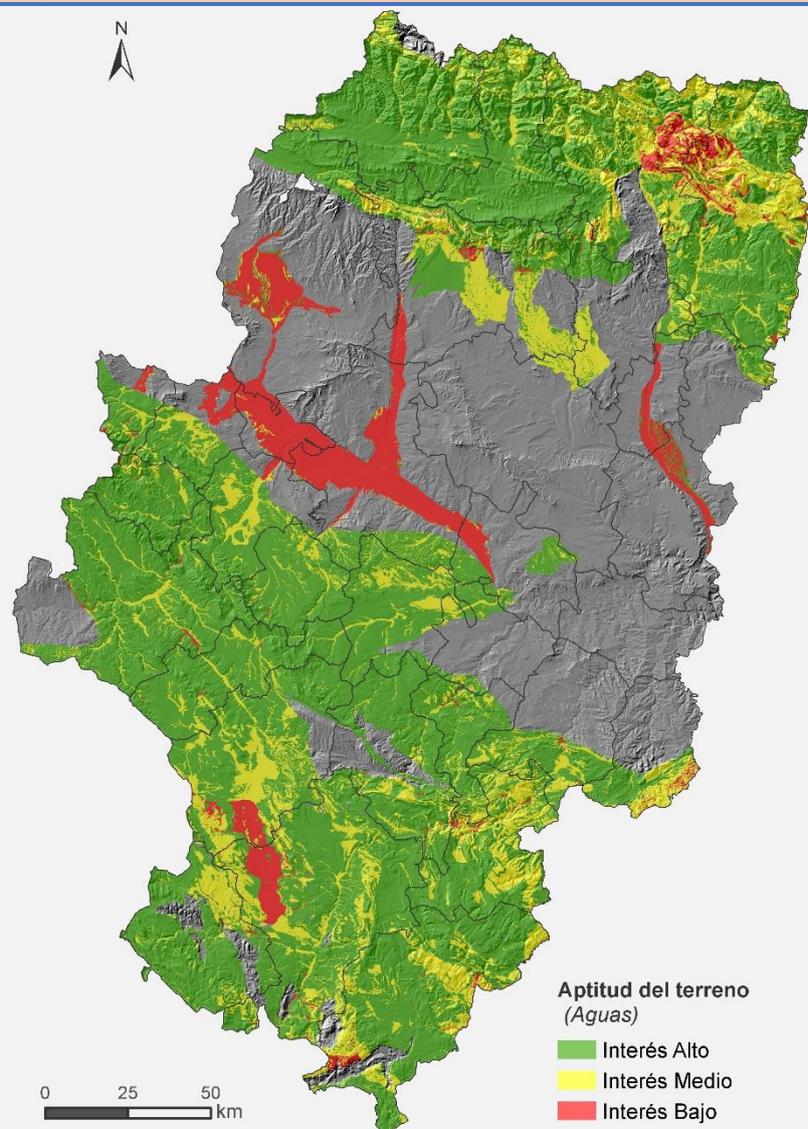
**MAPA 2.B. RESULTADOS PARCIALES PARA LA DIMENSIÓN *APTITUD DEL TERRENO*****(Rocas y minerales industriales y rocas ornamentales)**

- Mapa resultante de la combinación de los indicadores representados en los mapas AT1, AT3.BC. y AT4.
- Categorías de recursos: rocas industriales, minerales industriales y rocas ornamentales.

- El indicador que valora la vulnerabilidad frente a los riesgos geológicos y climáticos tiene un peso más alto que en los grupos tratados en el mapa anterior, lo que se refleja en el mapa de resultados. De este modo, las áreas inundables quedarán todas englobadas dentro de la categoría más baja
- El área ocupada por la categoría de interés bajo en el margen septentrional de la región se reduce considerablemente con respecto al mapa anterior, pasando grandes extensiones de este territorio a la clase de interés medio y algunas, especialmente en la mitad oriental, a la de interés alto.

## MAPA 2.C. RESULTADOS PARCIALES PARA LA DIMENSIÓN *APTITUD DEL TERRENO*

(Aguas)

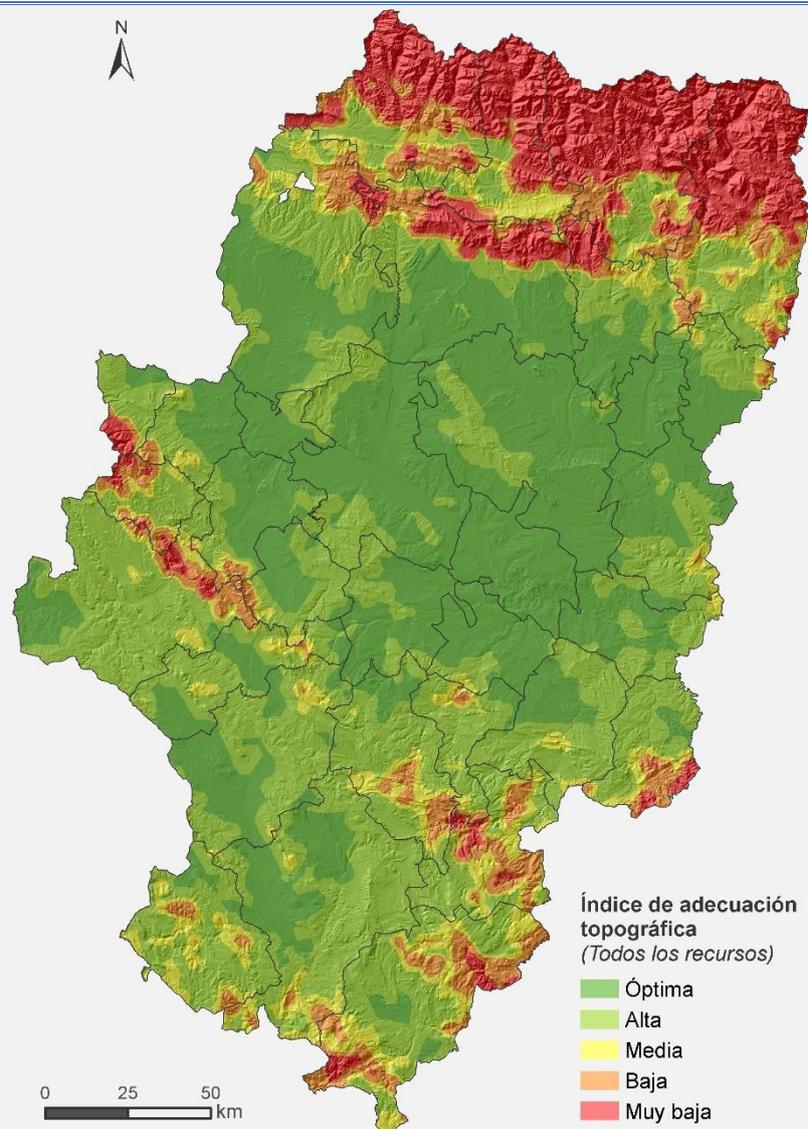


- Mapa resultante de la combinación de los indicadores representados en los mapas AT1, AT2, AT3.BC. y AT4.
- Categorías de recursos: aguas
- Resultados disponibles para la extensión de las masas de agua subterráneas.

- Resultados muy positivos en esta dimensión en gran parte del territorio, especialmente en los dominios montañosos de la región.
- Dentro de las áreas montañosas solo han sido clasificadas con un interés bajo algunas áreas muy concretas, como el sur del valle del Jiloca, o una fracción de los Pirineos situada entre las comarcas del Sobrarbe y La Ribagorza.
- La categoría más baja es, prácticamente, la única presente en los acuíferos aluviales localizados en la depresión del Ebro, así como en el del río Cinca.

## MAPA AT1. INDICADOR: ÍNDICE DE ADECUACIÓN TOPOGRÁFICA

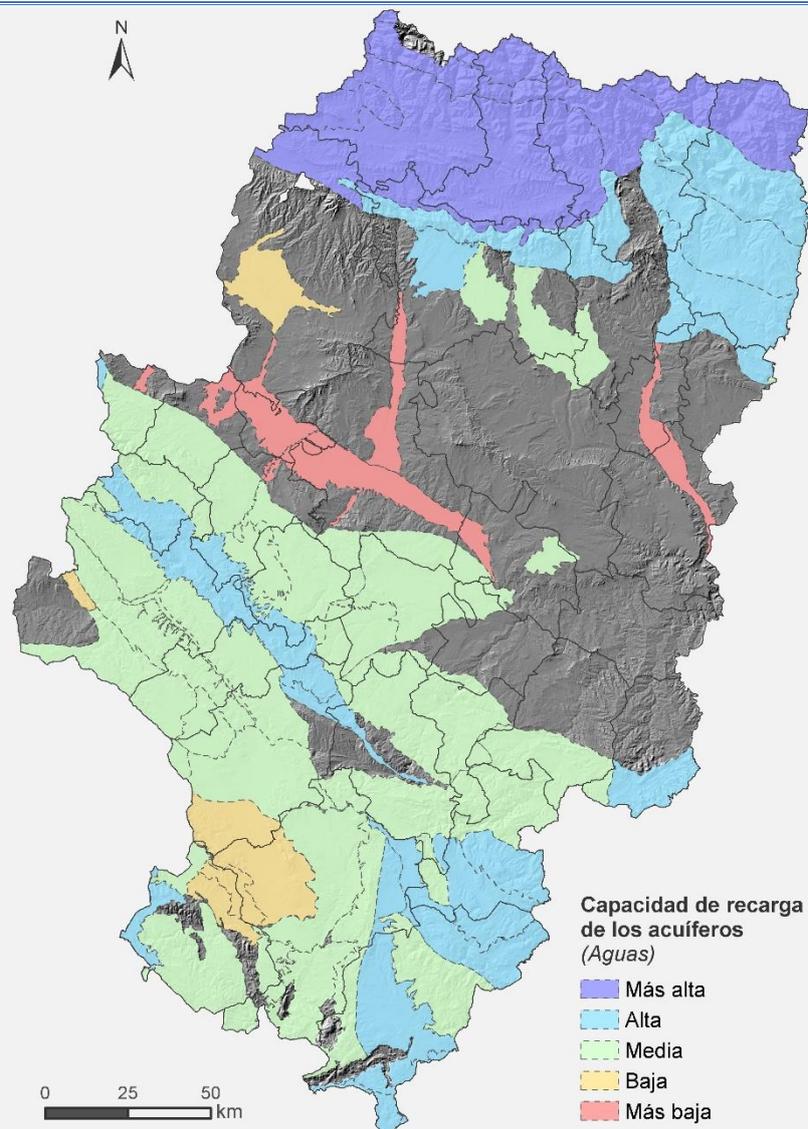
### DIMENSIÓN: APTITUD DEL TERRENO



- Indicador calculado mediante un índice.
- Mapa generado a partir de la interpolación de los puntos del territorio con información asociada a dicho índice.
- Factores considerados: pendiente y amplitud de cotas.

- Distribución predecible de las diversas categorías que componen el indicador: la adecuación más baja, característica de territorios en los que la pendiente media y la diferencia entre cotas es elevada, coincide con las áreas montañosas de la región.
- Las categorías del índice de adecuación topográfica más baja comprenden todo el Pirineo Axial, una parte importante de las Sierras Exteriores, las Sierras del Moncayo y otras elevaciones de la Cordillera Ibérica zaragozana, así como en algunas sierras de la Ibérica turolense, como los Puertos de Beceite y las sierras de Gúdar, Javalambre, Maestrazgo y Albarracín.
- Las categorías altas en el indicador referente al índice de adecuación topográfica están reservadas a las zonas más llanas de la región, que incluyen la práctica totalidad de la depresión del Ebro hasta las Sierras Exteriores, el valle del Jiloca y el entorno de la ciudad de Teruel.

## MAPA AT2. INDICADOR: CAPACIDAD DE RECARGA DE LOS ACUÍFEROS DIMENSIÓN: APTITUD DEL TERRENO

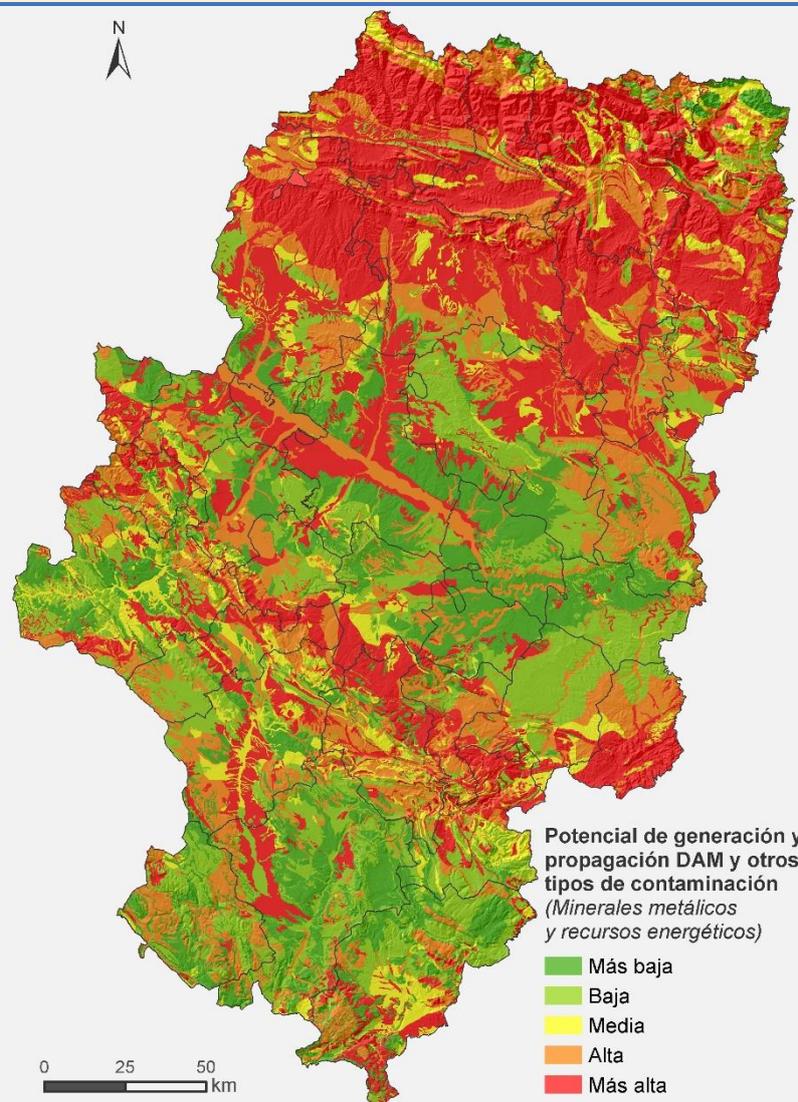


- Factores considerados: distribución de las masas de agua subterránea, precipitación media anual, permeabilidad.
- Indicador exclusivo para el grupo de las aguas.
- Resultados disponibles para la extensión de las masas de agua subterráneas.

- Todos los acuíferos catalogados dentro de la clase correspondiente a la capacidad de recarga más alta se encuentran ubicados en la región pirenaica, especialmente en su margen occidental.
- Los localizados al sur de los Pirineos y en la frontera con Cataluña fueron incluidos en la categoría inmediatamente inferior. A esta misma clase pertenecerán algunas de las masas de agua subterráneas situadas bajo la Cordillera Ibérica.
- Casi todo el resto de los acuíferos localizados en el Sistema Ibérico presentan una capacidad de recarga calificada como media, excepto los situados al sur de la comarca del Jiloca y al norte de la Comunidad de Teruel, cuya posibilidad de recarga es más limitada.
- Dentro de la categoría más baja fueron agrupados los aluviales de los ríos Ebro y Gállego, localizados en la depresión del Ebro, y del río Cinca, en el somontano pirenaico.

## MAPA AT3.A. INDICADOR: GENERACIÓN Y DIFUSIÓN DEL DAM Y OTROS TIPOS DE CONTAMINANTES

DIMENSIÓN: APTITUD DEL TERRENO

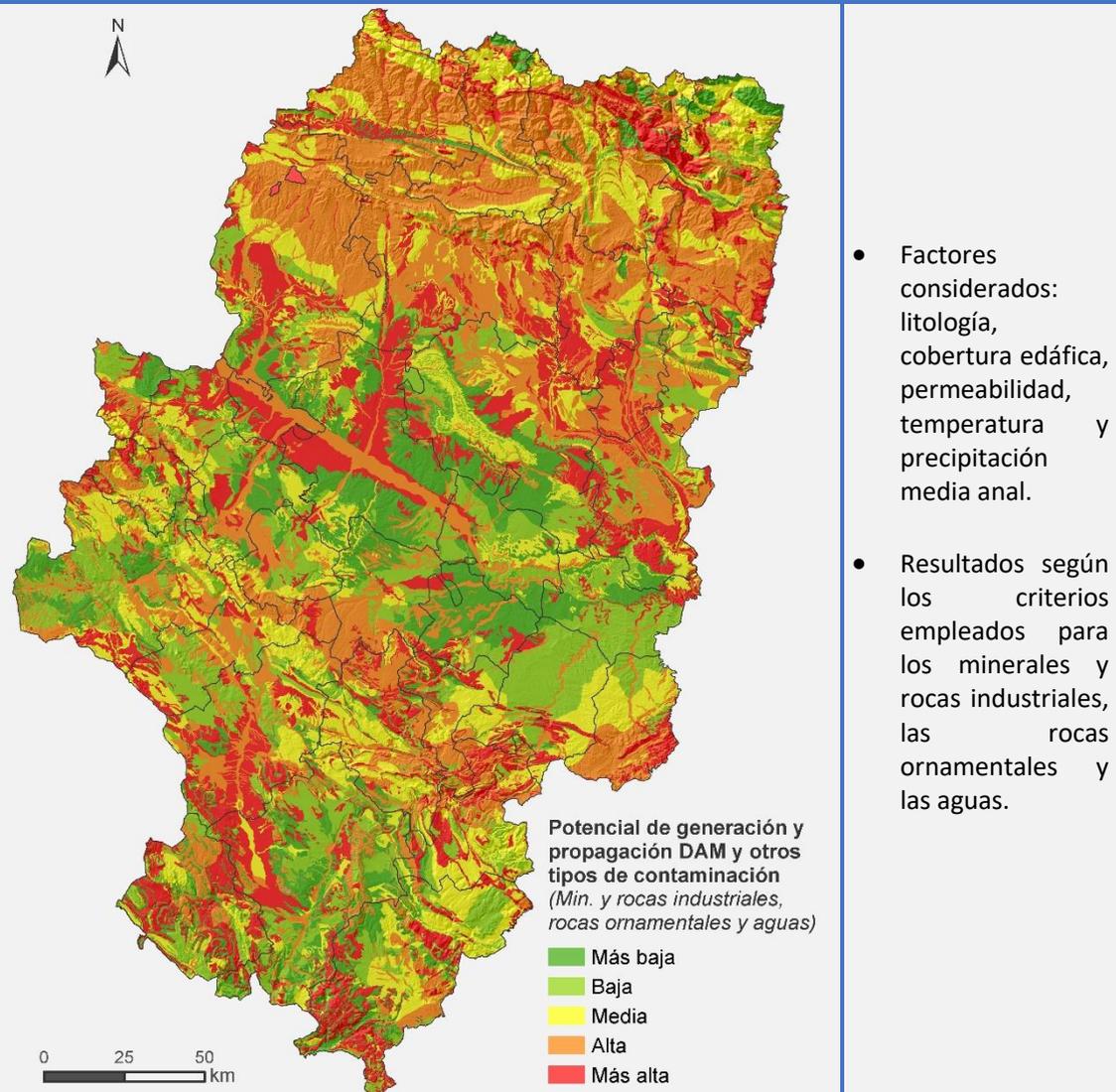


- Factores considerados: litología, cobertura edáfica, permeabilidad, temperatura y precipitación media anual.
- Resultados según los criterios empleados para los minerales metálicos y los recursos energéticos.

- Grandes contrastes en la distribución de las diversas categorías en el territorio aragonés.
- Prácticamente toda la provincia de Huesca y la comarca de las Cinco Vilas presentan un potencial de generación y propagación del DAM muy alto. Esta categoría se encuentra en las otras dos provincias aragonesas con una zonificación mucho más limitada espacialmente.
- En las provincias de Zaragoza y Teruel se registran extensas áreas correspondientes a las categorías de generación y propagación del DAM bajas o muy bajas. Entre ellas destacan el centro de la provincia de Teruel y la depresión del Ebro, especialmente aguas abajo de la ciudad de Zaragoza.

## MAPA AT3.BC. INDICADOR: GENERACIÓN Y DIFUSIÓN DEL DAM Y OTROS TIPOS DE CONTAMINANTES

DIMENSIÓN: APTITUD DEL TERRENO

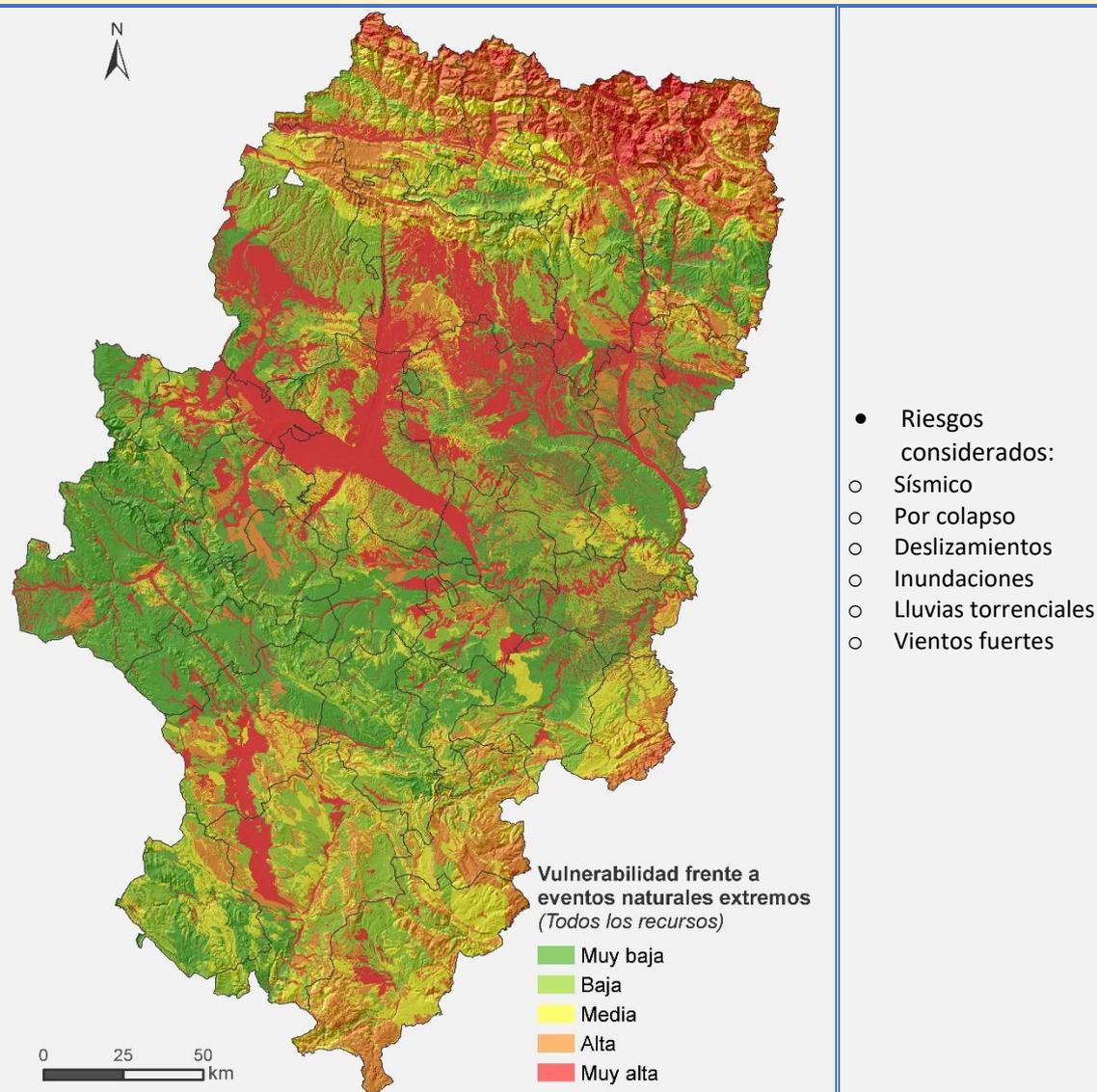


- Factores considerados: litología, cobertura edáfica, permeabilidad, temperatura y precipitación media anal.
- Resultados según los criterios empleados para los minerales y rocas industriales, las rocas ornamentales y las aguas.

- Resultados muy diferentes con respecto al mapa relativo a los recursos energéticos y los minerales metálicos.
- Con los criterios empleados para estas categorías de recursos, en la que la generación del DAM no es tan valorada como la posibilidad de penetración de otros frentes contaminantes en el subsuelo, gran parte del norte del territorio deja de pertenecer a la categoría más problemática para pasar a formar parte de clases medias o altas.
- Con estos nuevos criterios, parece que las zonas más conflictivas se concentran en el centro-sur de la comunidad, en el entorno del valle del Ebro, en las serranías de la Ibérica turolense y en el valle del Jiloca.

## MAPA AT4. INDICADOR: VULNERABILIDAD FRENTE A EVENTOS NATURALES EXTREMOS

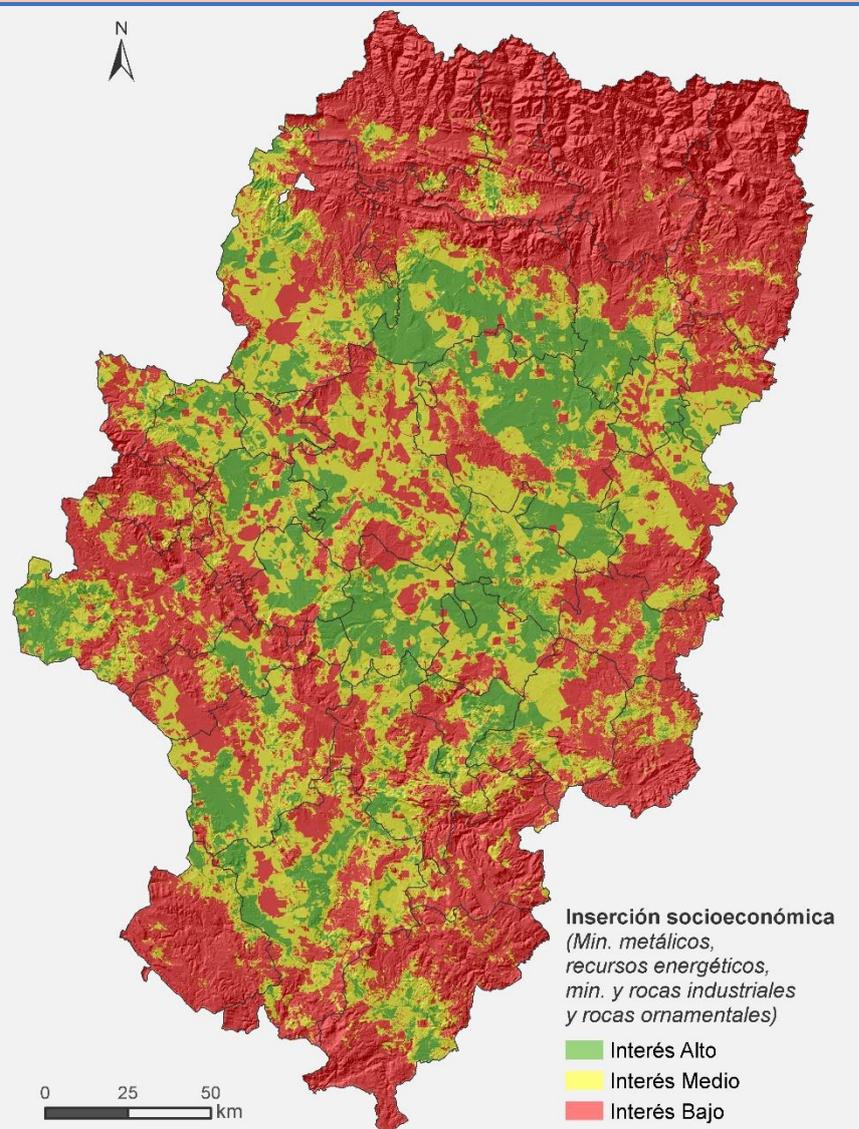
DIMENSIÓN: APTITUD DEL TERRENO



- El riesgo de inundación, al haber sido catalogado como el más peligroso para los seres humanos y sus bienes dentro del contexto aragonés, será el más influyente en la valoración final.
- Prácticamente todos los territorios susceptibles de sufrir procesos de inundación han sido catalogados dentro de la clase de vulnerabilidad más alta (valle del Ebro y el cauce bajo del río Gállego, llanuras de inundación de los ríos Cinca y Alcanadre, gran parte de la Hoya de Huesca y el sur de las Cinco Villas, valle del Jiloca, etc.).
- Los Pirineos, donde se conjugan riesgos elevados para varios procesos naturales, presentan, como mínimo, un valor de vulnerabilidad media en prácticamente todo el territorio, llegando a alcanzar la categoría correspondiente a una vulnerabilidad muy alta en varios puntos, especialmente concentrados en el margen oriental.
- Gran parte del Sistema Ibérico de la provincia de Zaragoza y el norte de la de Teruel ha sido catalogado dentro de la clase de vulnerabilidad muy baja, especialmente aquellas áreas más alejadas de los principales ríos.

### MAPA 3.AB. RESULTADOS PARCIALES PARA LA DIMENSIÓN *INSERCIÓN SOCIOECONÓMICA*

(Rec. energéticos, min. metálicos, min. y rocas industriales, rocas ornamentales)

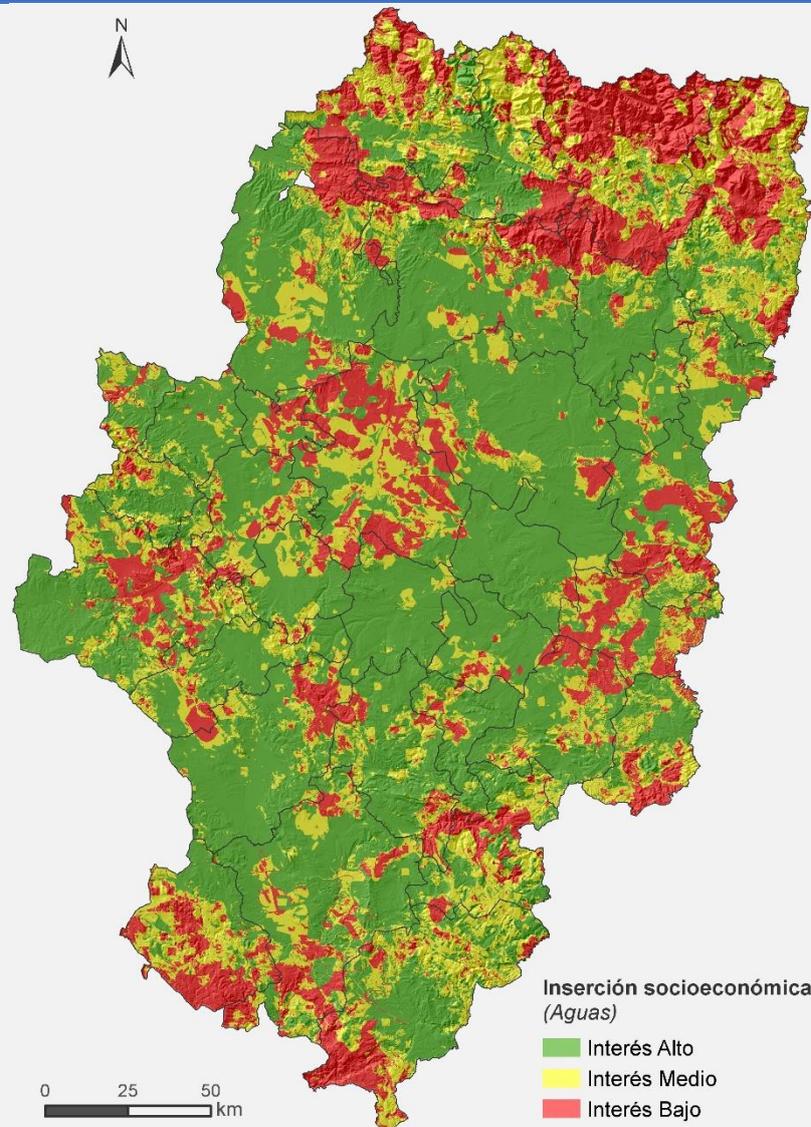


- Mapa resultante de la combinación de los indicadores representados en los mapas IS1, IS2 IS3.AB, IS4, IS5, IS6 e IS7.
- Categorías de recursos: minerales metálicos, recursos energéticos, rocas industriales, minerales industriales y rocas ornamentales.

- Clara diferenciación entre las categorías predominantes en las áreas montañosas de la comunidad y los territorios más llanos.
- Las zonas topográficamente más complejas han sido englobadas dentro de la categoría de interés bajo. Pertencerán a ella prácticamente toda el área pirenaica y de las Sierras Exteriores, así como una parte importante de las sierras ibéricas como la de Albarracín, Gúdar, Javalambre, Maestrazgo y los Puertos de Beceite.
- El entorno de la ciudad de Zaragoza fue calificado dentro de la clase de interés medio, debido a la baja puntuación recibida en algunos indicadores como el impacto potencial en la economía y las afecciones a la población, que contrasta con los buenos datos logrados en el acceso a infraestructuras, las afecciones al paisaje o la interacción con los usos del suelo.
- Muchas áreas de la región caracterizadas por poseer pendientes suaves han sido englobadas dentro de la categoría de interés alto.
- Las zonas que muestran valores de interés medio se configuran como un paso entre las otras dos categorías, sin presentar extensiones remarcables dentro del territorio.

### MAPA 3.C. RESULTADOS PARCIALES PARA LA DIMENSIÓN *INSERCIÓN SOCIOECONÓMICA*

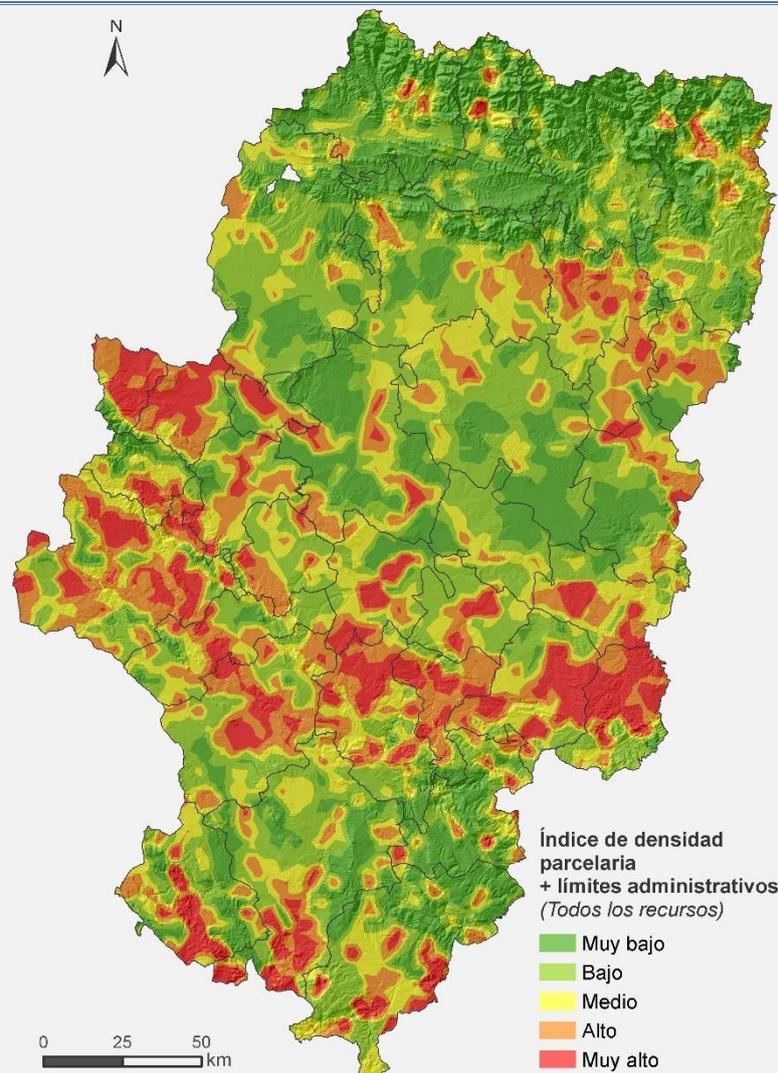
(Aguas)



- Mapa resultante de la combinación de los indicadores representados en los mapas IS1, IS2 IS3.C, IS4, IS5, IS6 e IS7.
- Resultados correspondientes al grupo de las aguas.

- Panorama muy diferente al que presentaban los recursos mineros.
- La distribución de las áreas calificadas como de interés bajo sigue un patrón similar al mapa obtenido para el resto de grupos, concentradas en áreas montañosas y en el entorno de la ciudad de Zaragoza. Sin embargo, su extensión es mucho más reducida que en el caso anterior.
- Por su parte, la extensión de la clase que define las áreas de interés alto se ha expandido enormemente, llegando a ocupar la práctica totalidad de comarcas como el Campo de Borja, la Ribera Baja del Ebro, el Campo de Belchite, el Bajo Martín o la Comarca del Jiloca.

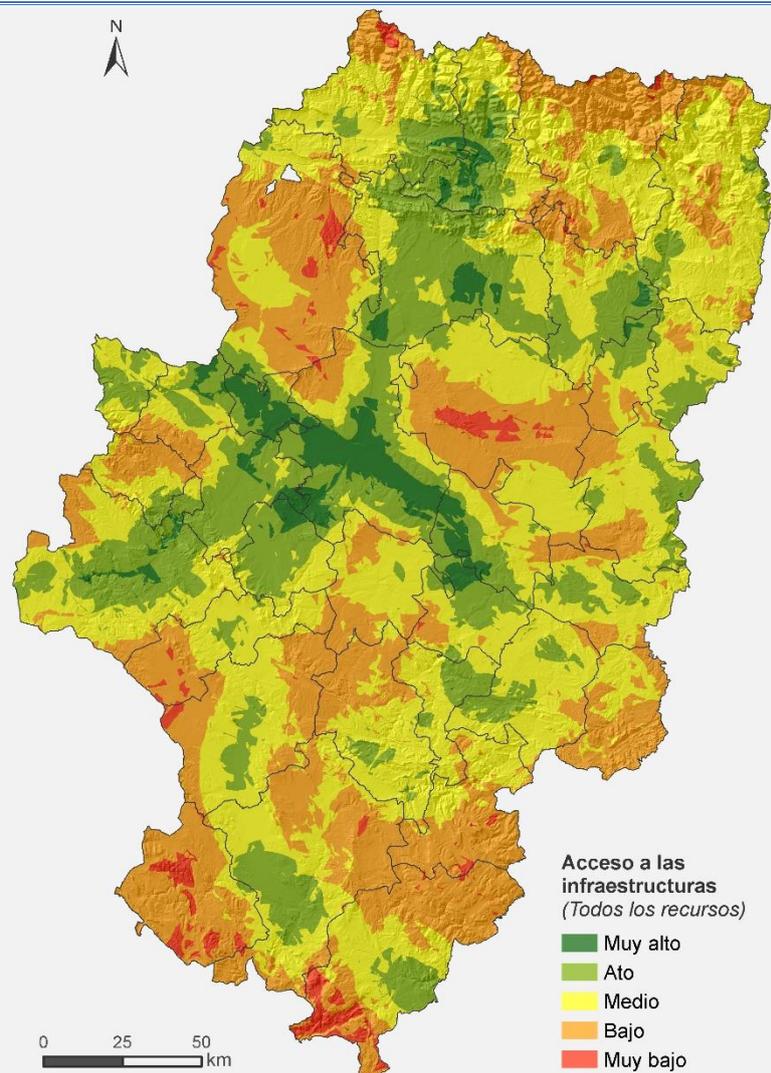
## MAPA IS1. INDICADOR: RÉGIMEN DE PROPIEDAD DEL TERRENO DIMENSIÓN: INSERCIÓN SOCIOECONÓMICA



- Indicador calculado mediante un índice.
- Mapa generado a partir de la interpolación de los puntos del territorio con información asociada a dicho índice.
- Factores considerados: parcelación del territorio y límites administrativos.

- En general, las provincias de Teruel y Zaragoza muestran un valor del índice que conjuga la densidad parcelaria con la existencia de límites administrativos muy alto.
- Estos valores elevados del índice son especialmente frecuentes en todo el norte de la provincia de Teruel, y especialmente en la zona del Bajo Aragón y el Matarraña.
- En la Ibérica zaragozana también predominan estas categorías, destacando el entorno de las localidades de Calatayud y Tarazona.
- En la provincia de Huesca, la categoría correspondiente al índice de densidad parcelaria más alto solo aparece en algunos puntos concretos del somontano más oriental.
- Los valores del índice más bajos son típicos de las áreas montañosas y con un menor desarrollo agrícola. Por un motivo diverso, que parece apuntar al predominio del latifundismo, algunas zonas de los Monegros, el Bajo Cinca y la Delimitación Comarcal de Zaragoza, también muestran unos valores muy bajos de densidad de parcelación.

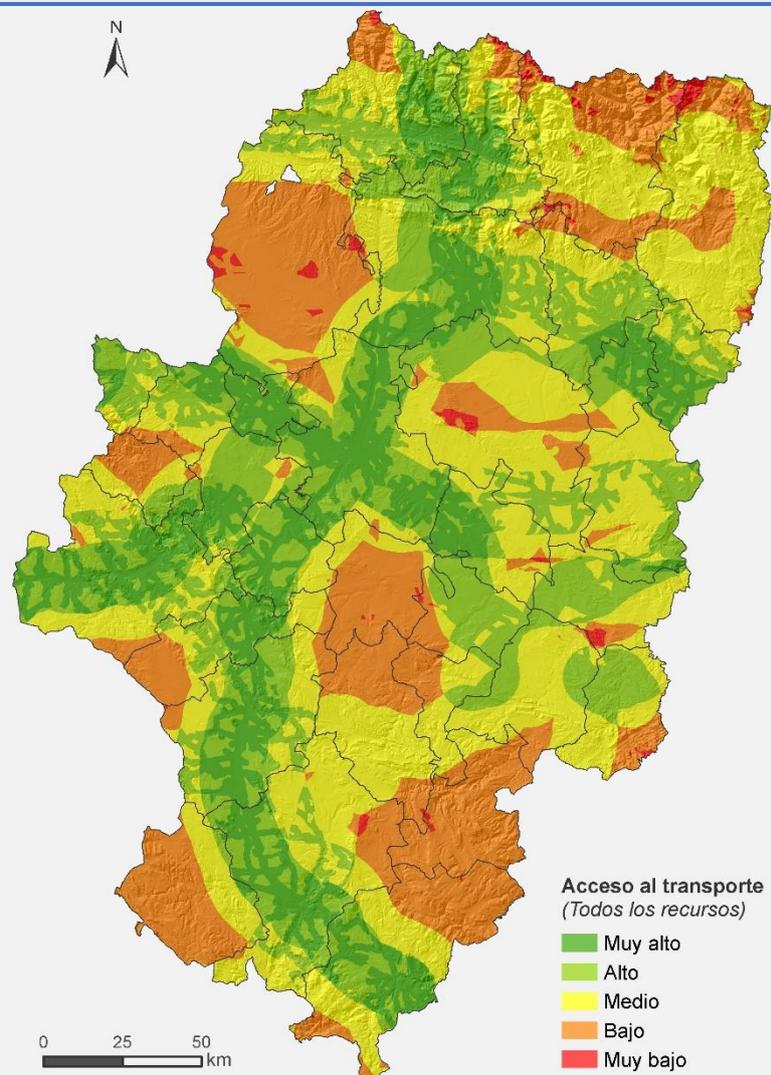
## MAPA IS2. INDICADOR: ACCESO A LAS INFRAESTRUCTURAS DIMENSIÓN: INSERCIÓN SOCIOECONÓMICA



- Factores considerados: acceso al transporte, agua, combustible y electricidad.
- Mapa generado por la combinación de los mapas IS2.1, IS2.2, IS2.3 e IS2.4.

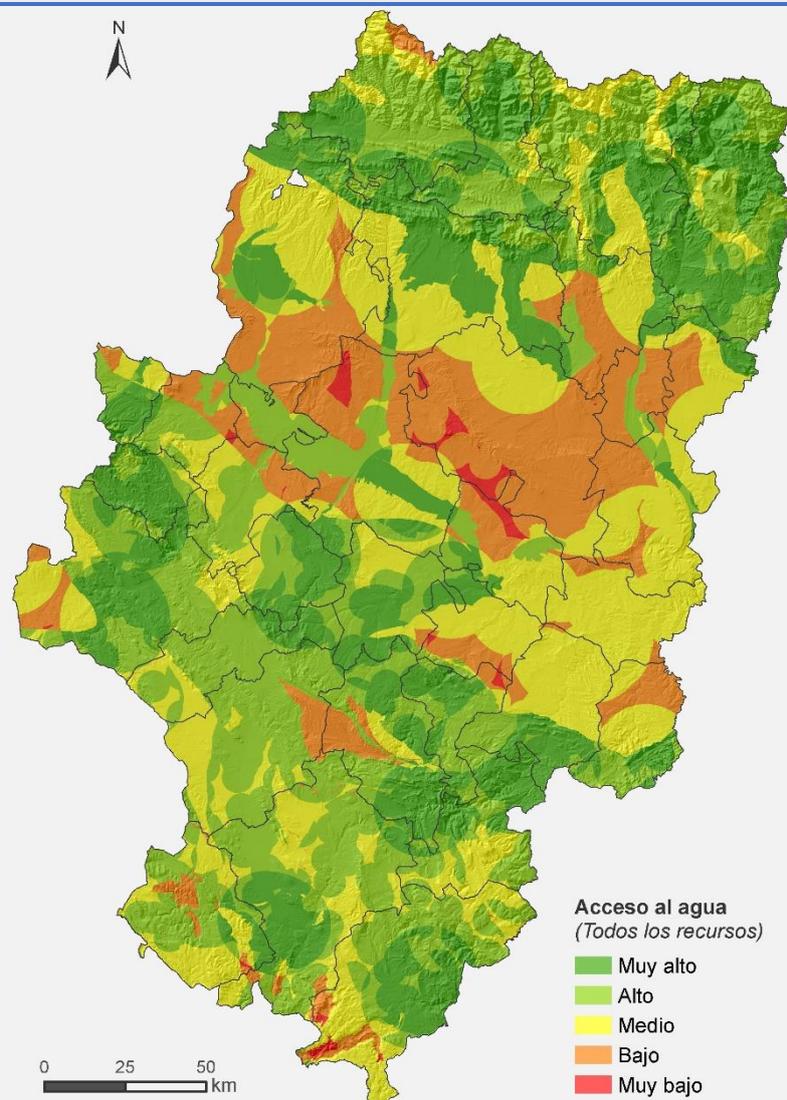
- El área que presenta una accesibilidad mayor a las infraestructuras coincide con la cuenca del Ebro, esencialmente en su ribera alta y media, en el entorno de Zaragoza.
- Otras áreas en la que la accesibilidad es alta o muy alta son las coincidentes con los grandes corredores de la comunidad, como el valle del río Jalón o la línea que une Zaragoza con el Pirineo.
- Otro de los grandes ejes de la región, el que articula Valencia con la capital aragonesa pasando por la ciudad de Teruel, presenta valores de accesibilidad media, que solo se transforman en altos en algunas áreas concretas en torno a los núcleos de población más importantes.
- La provincia de Teruel es la que va a mostrar unos valores de accesibilidad globales más bajos, con varias comarcas en las que dominan las categorías que indican un acceso a estos bienes o servicios más limitado. Fuera de la provincia de Teruel, tan solo las comarcas de las Cinco Villas, Belchite, Monegros, el Sobrarbe o La Ribagorza van a presentar una situación asimilable.

**MAPA IS2.1. INDICADOR: ACCESO A LAS INFRAESTRUCTURAS**  
**(Acceso al transporte)**  
**DIMENSIÓN: INSERCIÓN SOCIOECONÓMICA**



- Elementos considerados en el análisis: red de carreteras y red de ferrocarriles.

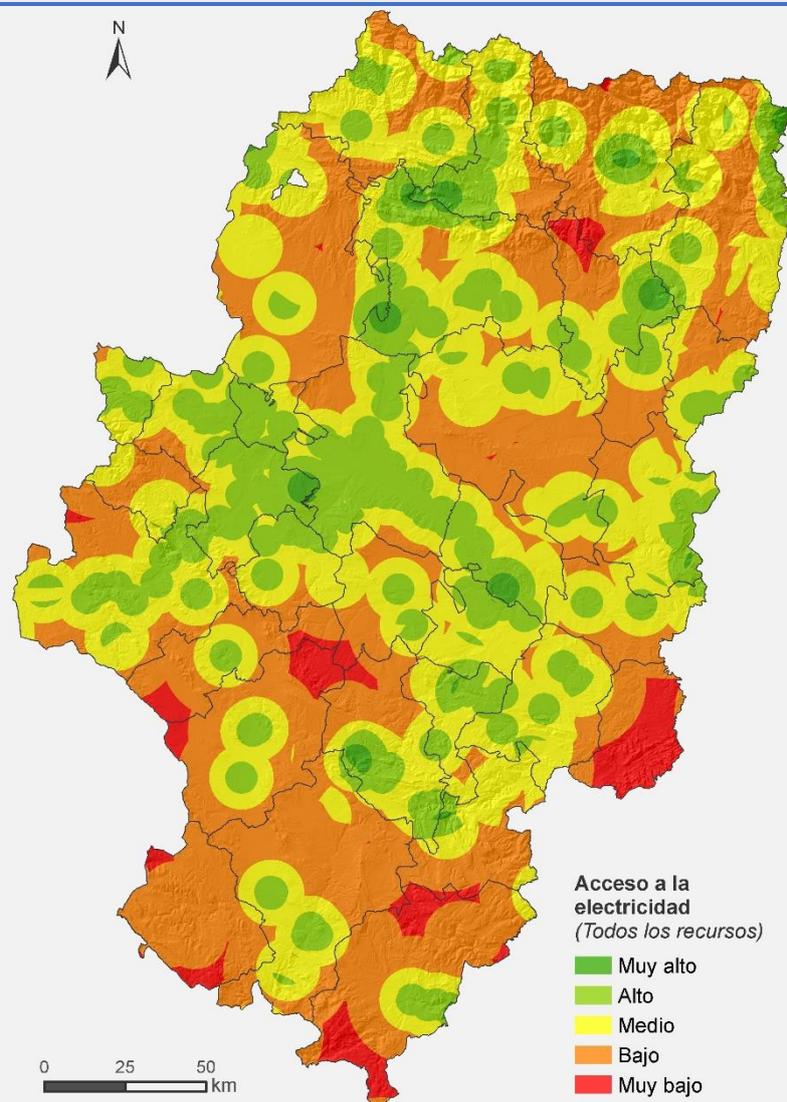
- Existen corredores en los que coinciden autopistas y autovías y vías férreas que definen zonas de accesibilidad alta o muy alta y que se corresponden principalmente con el valle del Ebro, la fosa de Calatayud y el corredor que une Francia con el Levante español, pasando por las tres capitales provinciales.
- Prácticamente, la totalidad del territorio correspondiente a las comarcas de la Sierra de Albarracín, Maestrazgo, Campo de Belchite, Cuencas Mineras, Cinco Villas, Aranda, la Ribagorza y el Sobrarbe muestran problemas de accesibilidad importantes, presentando valores catalogados como medios o bajos.

**MAPA IS2.2. INDICADOR: ACCESO A LAS INFRAESTRUCTURAS****(Acceso al agua)****DIMENSIÓN: INSERCIÓN SOCIOECONÓMICA**

- Elementos considerados en el análisis: red fluvial y de canalizaciones de agua, embalses, depósitos de agua y masas de agua subterráneas.

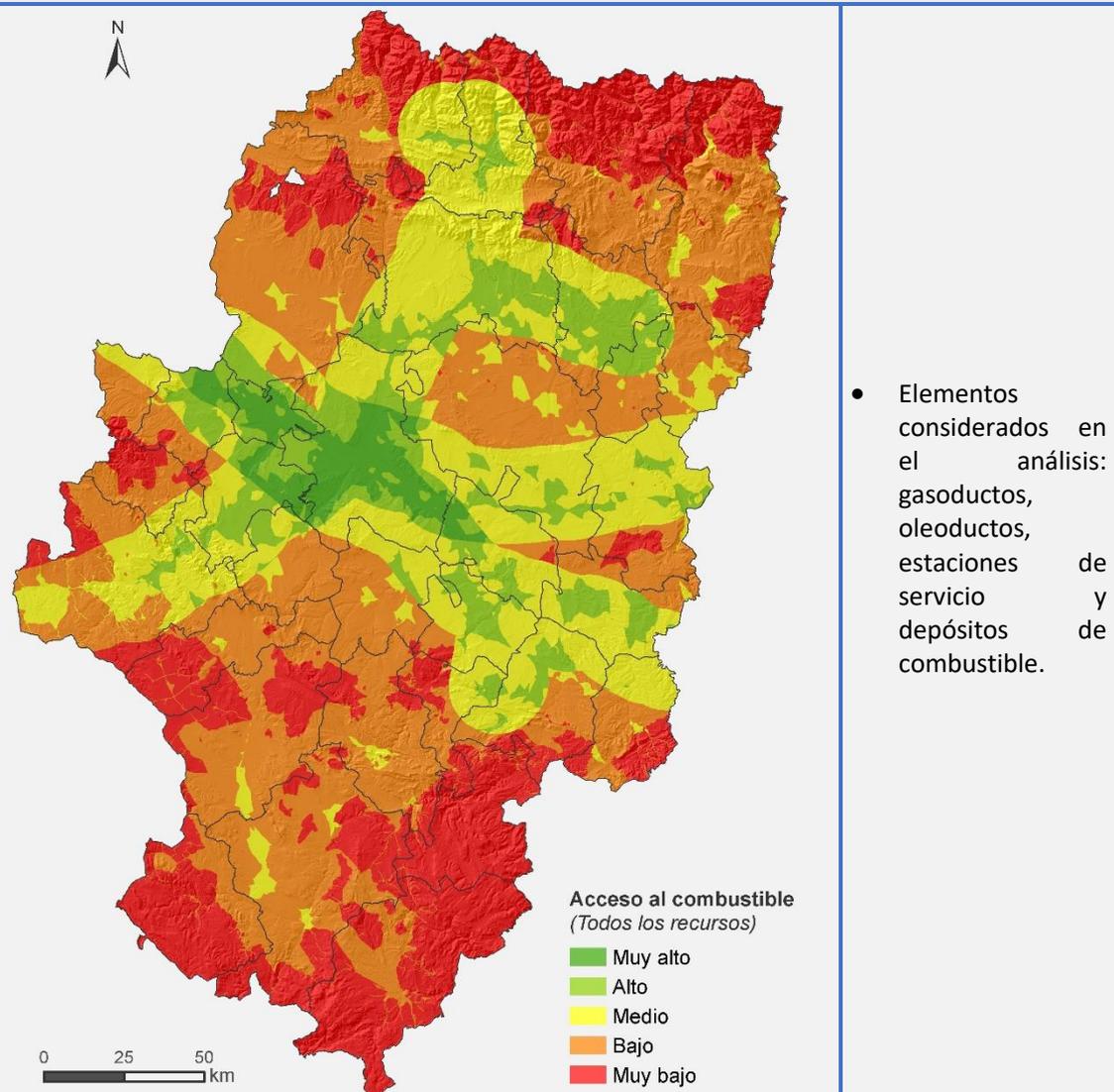
- Existen áreas en el territorio aragonés en las que coinciden todos los elementos considerados en la valoración, por lo que recibirán la puntuación más alta de accesibilidad a los recursos hídricos. Estas zonas se extienden principalmente a lo largo la rama septentrional de la Cordillera Ibérica, así como en el Somontano Pirenaico. Casi todo el resto del territorio aragonés localizado en el Sistema Ibérico, así como en los Pirineos presenta, en su mayoría, valores de accesibilidad al agua medios, altos o muy altos.
- Por el contrario, las zonas que muestran un acceso al agua más deficiente se localizan de forma muy extendida al norte del valle del Ebro. Especialmente llamativo es el caso de la comarca de los Monegros, donde gran parte del territorio presenta valores de accesibilidad bajos o muy bajos.

**MAPA IS2.3. INDICADOR: ACCESO A LAS INFRAESTRUCTURAS**  
**(Acceso a la electricidad)**  
**DIMENSIÓN: INSERCIÓN SOCIOECONÓMICA**



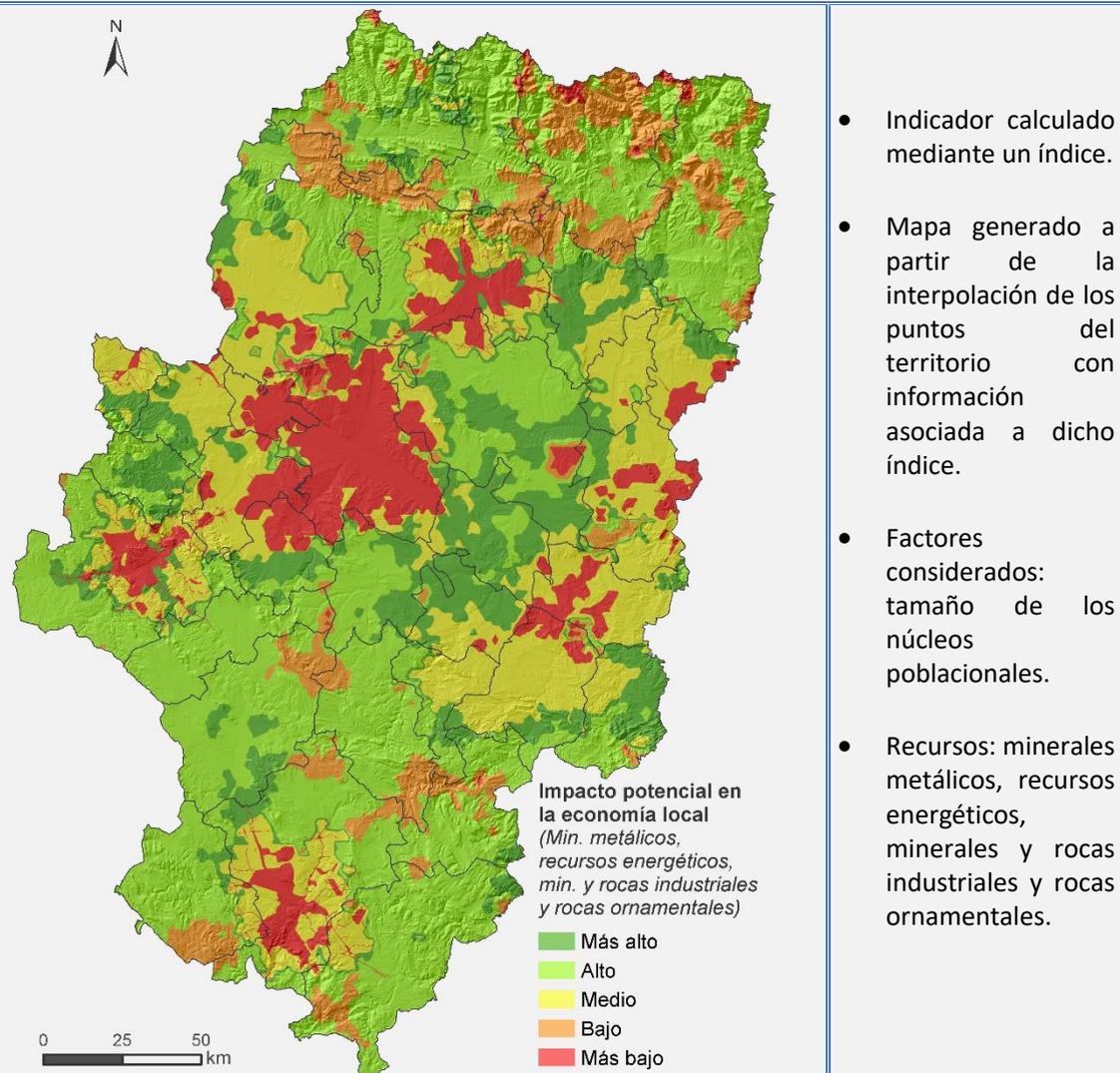
- Elementos considerados en el análisis: red eléctrica, centrales y subestaciones eléctricas.

- Según los criterios empleados, existe una serie de corredores en los que el acceso a la energía presenta valores máximos (accesibilidad alta y muy alta), siendo el más representativo el que configura el valle del Ebro, especialmente en su ribera alta. Otros *corredores energéticos* de la región coinciden con el valle del río Jalón, el valle del río Gállego, o la frontera entre Huesca y Cataluña.
- La mayor parte de las zonas cuya accesibilidad a la electricidad ha sido calificada como baja o muy baja se localizan en la provincia de Teruel. De hecho, exceptuando el Bajo Aragón y las Cuencas Mineras, en el resto de la provincia solo se registran zonas catalogadas como de accesibilidad alta en algunos núcleos importantes localizados en el eje Zaragoza-Valencia. Por otro lado, comarcas como la Sierra de Albarracín o la del Matarraña muestran valores de accesibilidad baja o muy baja en la práctica totalidad de su territorio.

**MAPA IS2.4. INDICADOR: ACCESO A LAS INFRAESTRUCTURAS****(Acceso al combustible)****DIMENSIÓN: INSERCIÓN SOCIOECONÓMICA**

- El área que cuenta con una mayor disponibilidad de elementos que determinan el acceso al combustible es la depresión del Ebro, especialmente en el entorno de la ciudad de Zaragoza y en la ribera alta de este río. El corredor localizado entre las ciudades de Barbastro y Huesca también presenta, según los criterios empleados, un acceso al combustible calificado como alto.
- Los valles del río Jalón y del río Gállego, al contar con la presencia de oleoductos y gasoductos, estarán zonificadas dentro de las categorías medias y altas.
- La categoría de acceso al combustible muy bajo cubre amplias zonas de la comunidad aragonesa, especialmente en las comarcas montañosas.

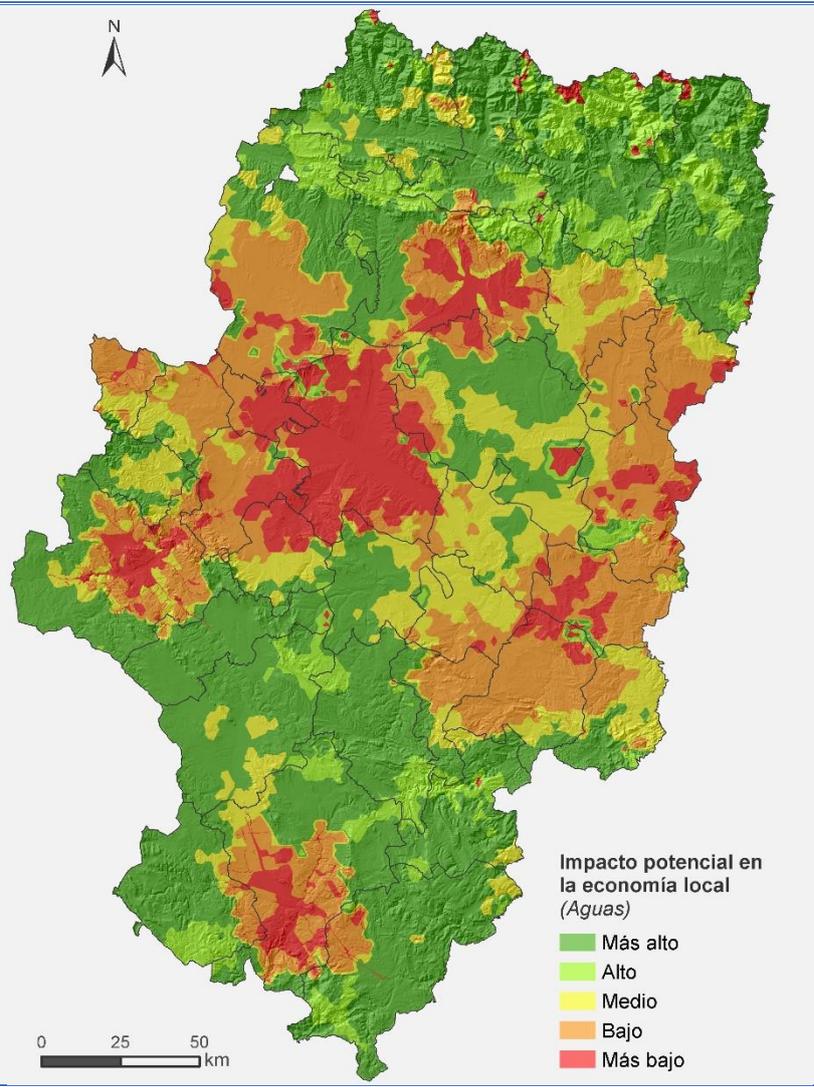
## MAPA IS3.AB. IMPACTO POTENCIAL EN LA ECONOMÍA LOCAL DIMENSIÓN: INSERCIÓN SOCIOECONÓMICA



- Indicador calculado mediante un índice.
- Mapa generado a partir de la interpolación de los puntos del territorio con información asociada a dicho índice.
- Factores considerados: tamaño de los núcleos poblacionales.
- Recursos: minerales metálicos, recursos energéticos, minerales y rocas industriales y rocas ornamentales.

- La categoría que considera que el impacto potencial en la economía de un territorio derivado de la puesta en marcha de una actividad extractiva será más bajo incluye las zonas que rodean los grandes núcleos de población de la comunidad, así como las áreas totalmente despobladas.
- La mayor parte del territorio ha sido incorporada a la segunda categoría más valorada (impacto potencial alto), que se corresponde con aquellas zonas del territorio en el que el tamaño medio de los municipios está comprendido entre 100 y 500 habitantes.

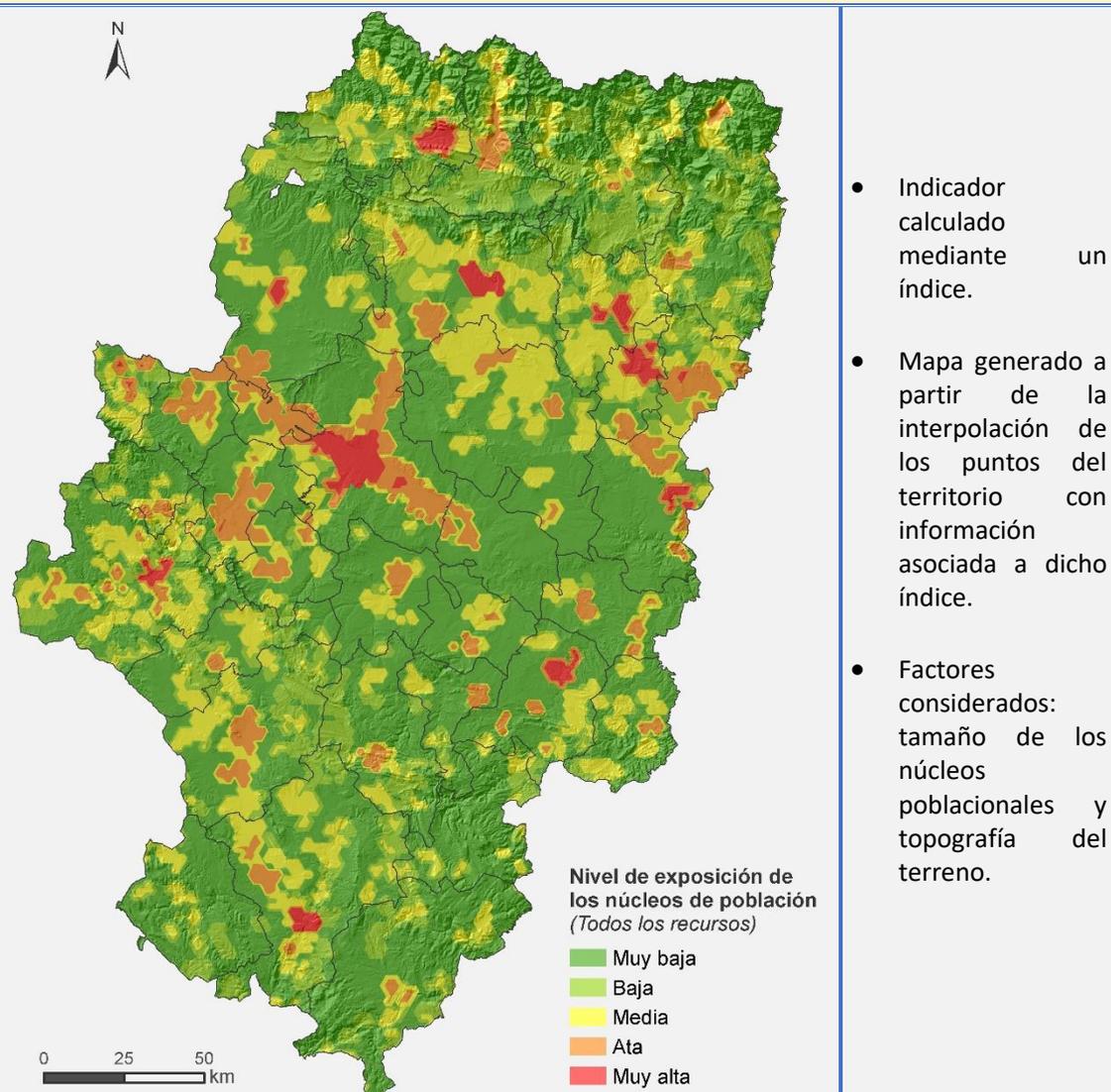
**MAPA IS3.C. IMPACTO POTENCIAL EN LA ECONOMÍA LOCAL**  
**DIMENSIÓN: INSERCIÓN SOCIOECONÓMICA**



- Indicador calculado mediante un índice.
- Mapa generado a partir de la interpolación de los puntos del territorio con información asociada a dicho índice.
- Factores considerados: tamaño de los núcleos poblacionales.
- Recursos: aguas

- El mapa que compartimenta el territorio según los criterios establecidos para el grupo de las aguas es idéntico al que analizaba al resto de recursos minerales, intercambiando entre sí las categorías de impacto bajo con medio, y las de impacto alto con muy alto.
- Un gran porcentaje del territorio, que antes se encontraba en la categoría ponderada con un peso de 4 (impacto potencial alto), pasará a formar parte del conjunto más valorado.

## MAPA IS4. NIVEL DE EXPOSICIÓN DE LOS NÚCLEOS DE POBLACIÓN DIMENSIÓN: INSERCIÓN SOCIOECONÓMICA

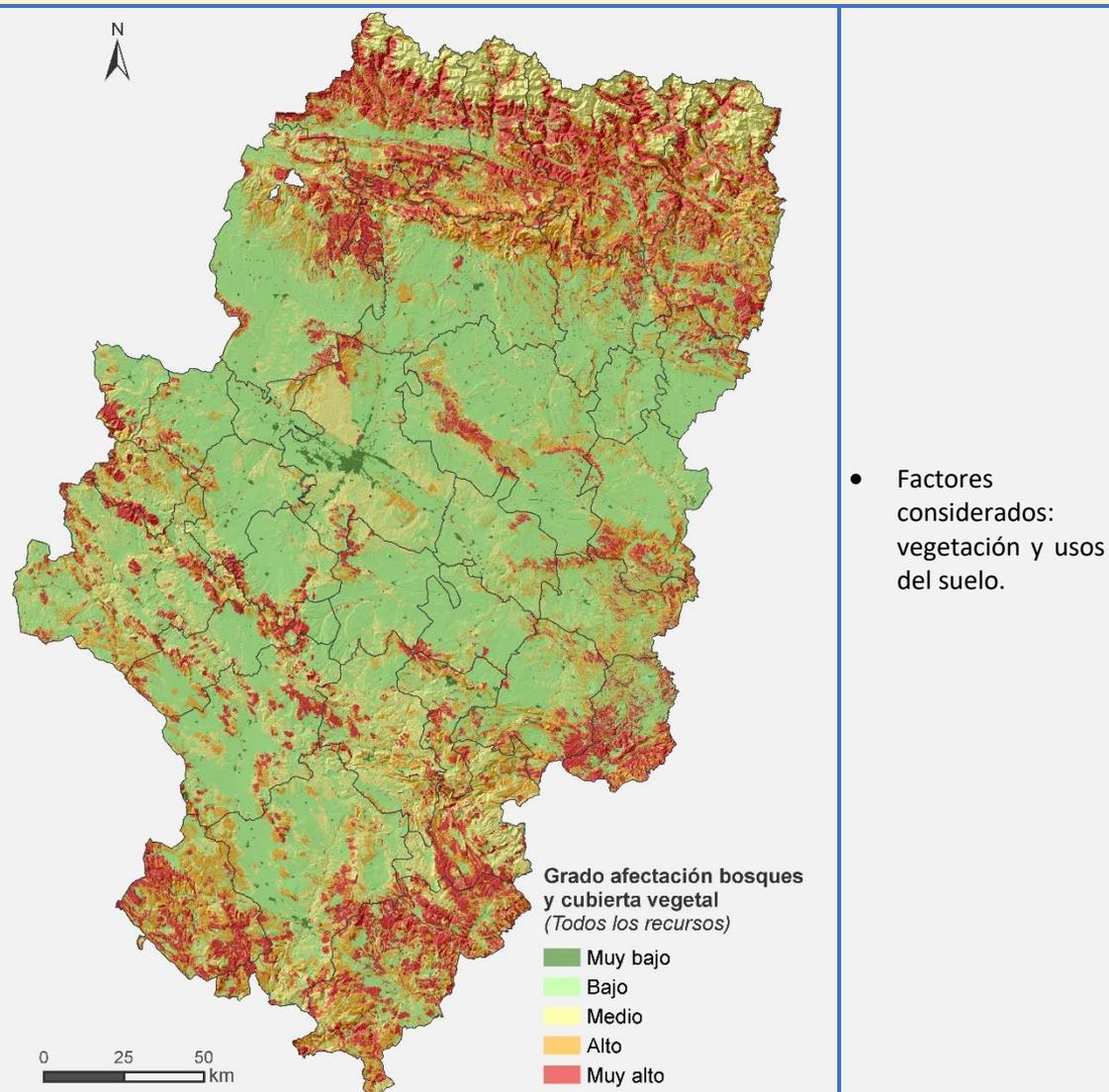


- Indicador calculado mediante un índice.
- Mapa generado a partir de la interpolación de los puntos del territorio con información asociada a dicho índice.
- Factores considerados: tamaño de los núcleos poblacionales y topografía del terreno.

- En una gran parte del territorio, especialmente de las provincias de Teruel y Zaragoza, la apertura de una labor minera no estaría expuesta directamente a ningún núcleo de población. Dentro de los límites territoriales de Huesca, esta categoría solo ocupa una extensión reseñable al sur de la provincia.
- La categoría que recibe el nombre de *Baja*, relativa a áreas en las que quedarían expuestas a la labor minera entre 1 y 100 personas, es mucho más reducida que la anterior, siendo especialmente frecuente en la depresión intrapirenaica.
- Las categorías menos valoradas, en las que la cantidad de población expuesta sería más elevada, ocupan unas porciones muy precisas del territorio, llegando a alcanzar extensiones considerables en áreas como el somontano oscense, el valle del Jalón o el corredor del Jiloca y, fundamentalmente, la ribera alta del Ebro.
- Las zonas en las que la población expuesta superaría los 10.000 habitantes están limitadas a las ciudades más pobladas de la región: Teruel y Alcañiz, en la provincia de Teruel; Jaca, Monzón, Barbastro, Fraga y la propia capital, en Huesca; y, en Zaragoza, además de la capital y su entorno, solo se alcanza este umbral en las localidades de Calatayud, Ejea de los Caballeros, Tarazona y La Almunida de Doña Godina.

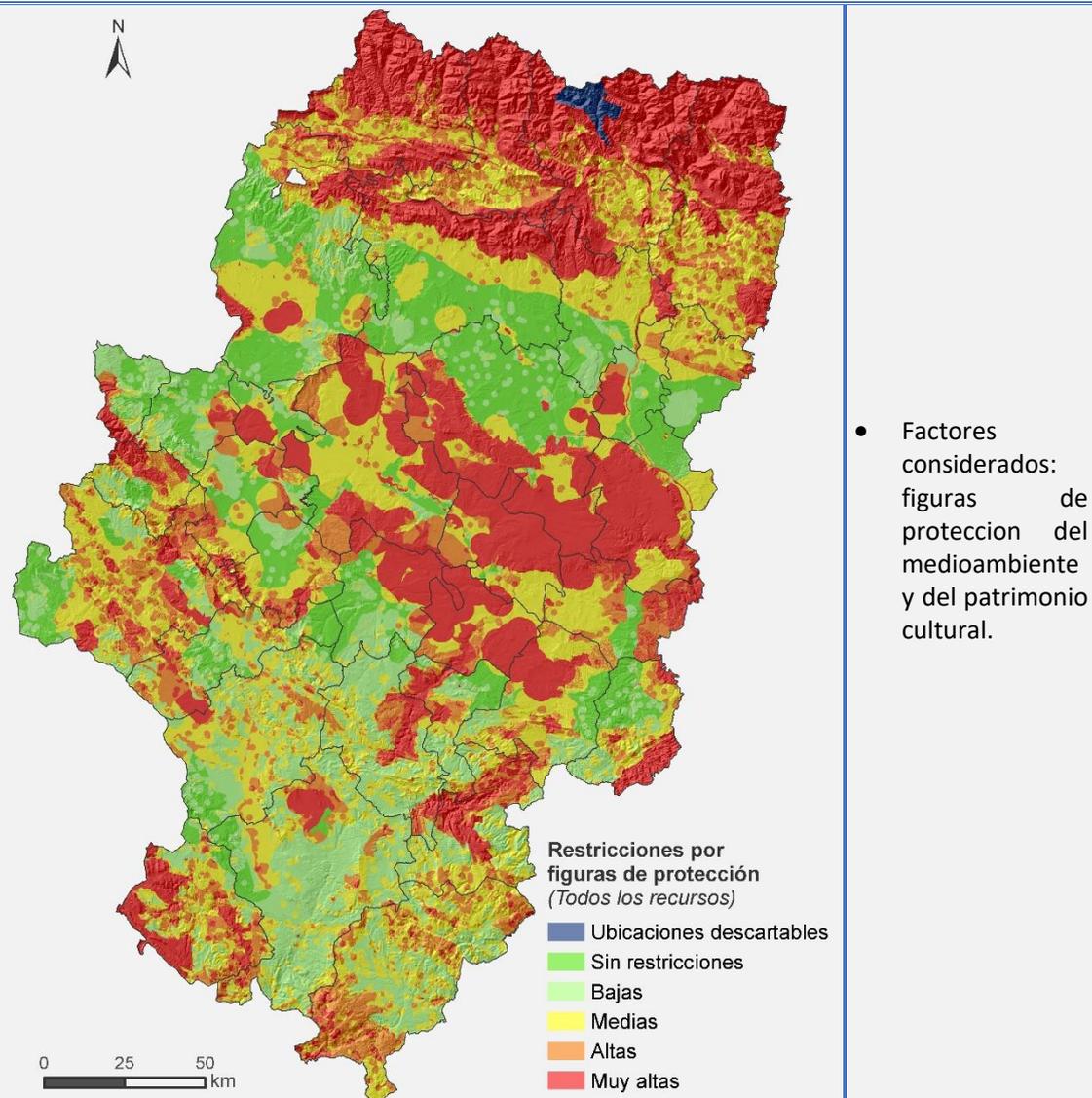
## MAPA IS5. AFECTACIONES DE LOS BOSQUES Y DE LA CUBIERTA VEGETAL

DIMENSIÓN: INSERCIÓN SOCIOECONÓMICA



- Clara concentración de superficies en las que la acción minera supondría una afección alta o muy alta a la cobertura vegetal en las zonas de montaña media de los Pirineos y la Cordillera Ibérica. Sin embargo, en la alta montaña el desarrollo vegetal está mucho más limitado como consecuencia de las bajas temperaturas.
- El desarrollo agrícola será más evidente en las zonas más llanas de la comunidad, lo entra en conflicto con la existencia de bosques y áreas de vegetación natural. Estas zonas en las que las afecciones a la vegetación serán menores se localizarán alrededor del valle del Ebro, Monegros y Cinco Villas y somontano oscense, el somontano de la Ibérica y el Bajo Aragón y las fosas del Jiloca y el Turia.
- Las áreas en la que el uso del suelo tiene origen exclusivamente antrópico, solo muestran una cierta continuidad en torno a las grandes ciudades, principalmente en los alrededores de la capital aragonesa.

## MAPA IS6. RESTRICCIONES POR FIGURAS DE PROTECCIÓN DIMENSIÓN: INSERCIÓN SOCIOECONÓMICA

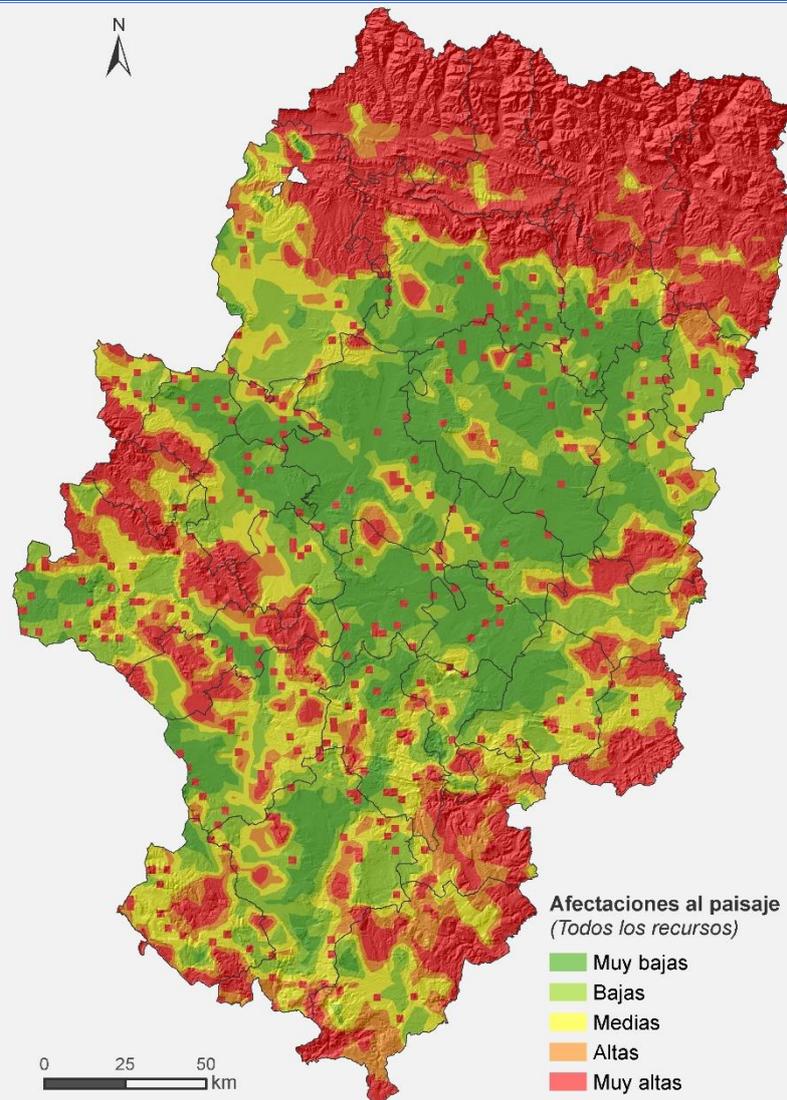


- Factores considerados: figuras de protección del medioambiente y del patrimonio cultural.

- Las áreas montañosas son las que, en su conjunto, presentan unas mayores limitaciones al desarrollo de labores mineras. Así, todo el Pirineo Axial, y gran parte de las Sierras Exteriores estarán englobadas dentro de la categoría que presenta unas restricciones más duras. También las serranías de la Cordillera Ibérica, especialmente en las comarcas turolenses de la Sierra de Albarracín, el norte del Maestrazgo y los Puertos de Beceite (Matarraña), así como la Sierra del Moncayo, en Zaragoza, presentarán unas limitaciones importantes.
- Fuera de las áreas montañosas, la coincidencia de varias figuras de protección destinadas, principalmente, a la conservación de hábitats de diversas especies de animales hace que el territorio localizado en los márgenes de la Ebro aguas abajo de la ciudad de Zaragoza hayan sido clasificadas dentro de las categorías correspondientes a unas restricciones altas.
- Los somontanos, tanto de la Ibérica como el pirenaico, aunque especialmente este último, carecen de figuras de protección en gran parte de su territorio, por lo que serán englobadas dentro de la categoría valorada con una puntuación más alta.

## MAPA IS7. AFECTACIONES DEL PAISAJE

### DIMENSIÓN: INSERCIÓN SOCIOECONÓMICA



- Indicador calculado mediante un índice.
- Mapa generado a partir de la interpolación de los puntos del territorio con información asociada a dicho índice.
- Factores considerados:  
Mapa del Paisaje de Aragón y distribución de los elementos singulares en el territorio.

- La categoría correspondiente a unas afectaciones al paisaje más graves ocupa, prácticamente, la totalidad de los Pirineos, gran parte de las sierras de la Cordillera Ibérica, tanto en la provincia de Zaragoza como en la de Teruel y el entorno del embalse de Mequinzenza.
- Por el contrario, las categorías que incluyen aquellos paisajes menos valorados se encuentran muy concentradas en la zona central de la Comunidad: en la depresión del río Ebro y zonas de los somontanos del Pirineo y de la Ibérica. También es destacable su presencia en áreas localizadas dentro de la Cordillera Ibérica, como en algunos tramos del río Jalón, el oeste de la comarca del Jiloca, o el tramo final del río Alfambra.

## Anexo II: Construcción y ejemplos de aplicación de la plataforma de visualización

## CONSTRUCCIÓN Y EJEMPLOS DE APLICACIÓN DE LA PLATAFORMA DE VISUALIZACIÓN

Como ya se comentó en el Capítulo V, cuyo contenido se relacionaba con las herramientas para la generación, análisis y presentación de la base de datos, uno de los objetivos de esta tesis consistía en la creación de una plataforma de visualización tanto de los resultados obtenidos en el análisis propuesto como de algunos de los datos auxiliares más interesantes para la contextualización de la actividad minera en la región aragonesa. Esta plataforma consiste en una aplicación web, realizada mediante la utilidad denominada *Web AppBuilder*, herramienta que permite generar aplicaciones de tipo geográfico utilizado como base un mapa alojado en la plataforma de *ArcGIS Online*.

El primer paso para la generación de la aplicación consistirá en la creación del mapa base, que en el entorno de *ArcGIS* recibe el nombre de *web map*. Dicho mapa definirá aspectos tales como las capas mostradas en la aplicación, su simbología, sus rangos de visibilidad o la habilitación y configuración de ventanas emergentes. Se trata de una fase muy importante para la elaboración de una *web app*. Este proceso comienza en *ArcGIS Desktop*, con la incorporación progresiva de toda la información que se desea incluir en la aplicación, definiendo su simbología, etiquetado de entidades, escalas de visualización y otros aspectos cartográficos. Una vez que esta información se considera apta para ser publicada será cargada en el servidor de *ArcGIS Online*.

Posteriormente, los datos alojados en el servidor deberán ser incluidos dentro del *web map* que será creado en la plataforma *ArcGIS Online*. Una vez agregada cada capa de forma individual, se comprobará que la simbología y los rangos de visibilidad sean los adecuados. Un paso fundamental del proceso consistirá en la habilitación y configuración de las ventanas emergentes pertinentes y de la información que se desea mostrar en ellas (Figura Anexo II.1.). Finalmente, se establecerá el nombre final de las capas, el orden de visualización y se seleccionaran aquellas que se activarán de un modo automático al iniciar la aplicación.

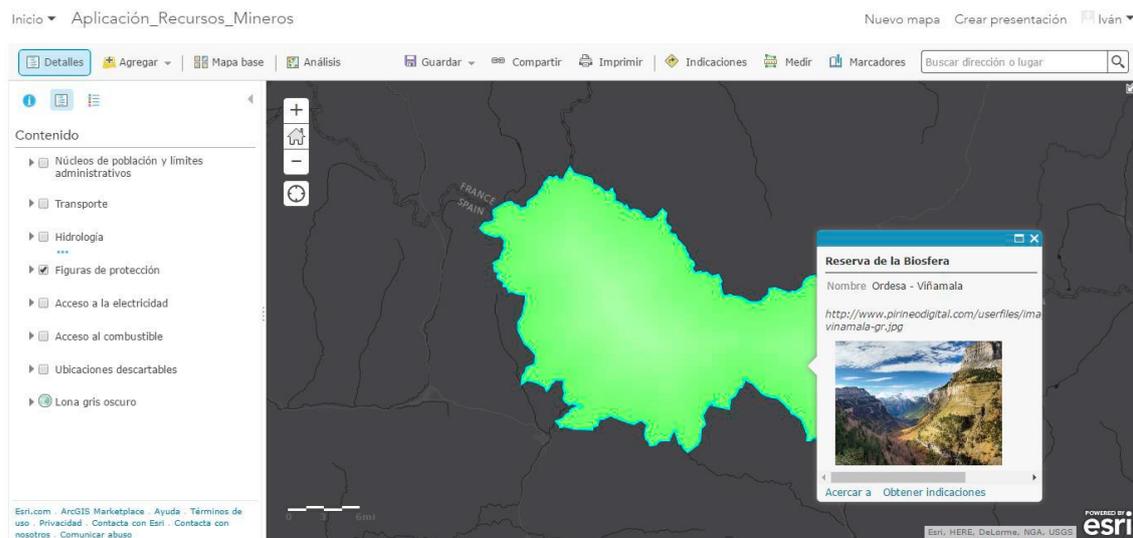


Figura Anexo II.1. Habilitación y configuración de ventanas emergentes para la capa Reservas de la Biosfera. Elaboración propia.

Una vez que el *web map* se encuentra finalizado y con todas sus opciones y características configuradas en *ArcGIS Online*, se procederá a la generación de la aplicación, mediante la utilización de la herramienta *Web AppBuilder* de *ArcGIS*. En el caso de la Aplicación sobre los Recursos Mineros de Aragón se seleccionó una aplicación 2D de tipo estándar (Figura Anexo II.2.).

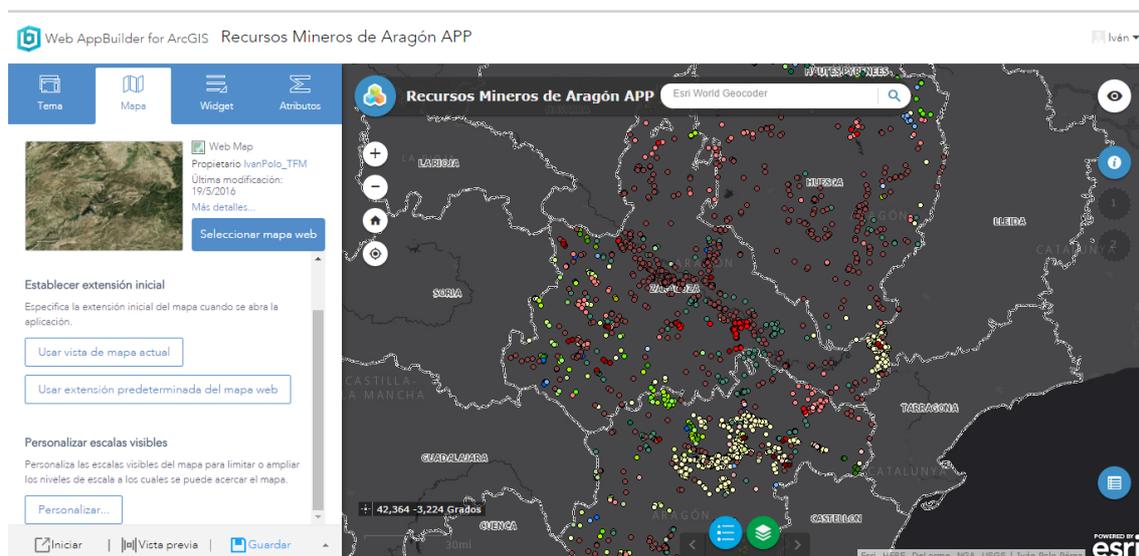


Figura Anexo II.2. Pestaña "Mapa" de *Web AppBuilder*. En ella se deberá seleccionar el *Web Map* que mostrará la aplicación, así como la extensión espacial visible al iniciar la aplicación. Elaboración propia.

Antes de comenzar con el proceso de inserción y configuración de las herramientas interactivas de la aplicación o *widgets*, según la nomenclatura de *Web AppBuilder*, se

seleccionará el tema, el estilo y el diseño que más se adecuen a las necesidades de la aplicación. Con el tema seleccionado (denominado *Launchpad*) aparecen de forma predeterminada dos herramientas de gran utilidad en cualquier aplicación basada en información de tipo geográfico. Se trata de la leyenda y de la lista de capas. El *widget* que contienen la lista de capas proporciona la posibilidad de desactivar o activar entidades en función de las necesidades del usuario, de alterar el orden de las mismas y de determinar su grado de transparencia u opacidad (Figura Anexo II.3).

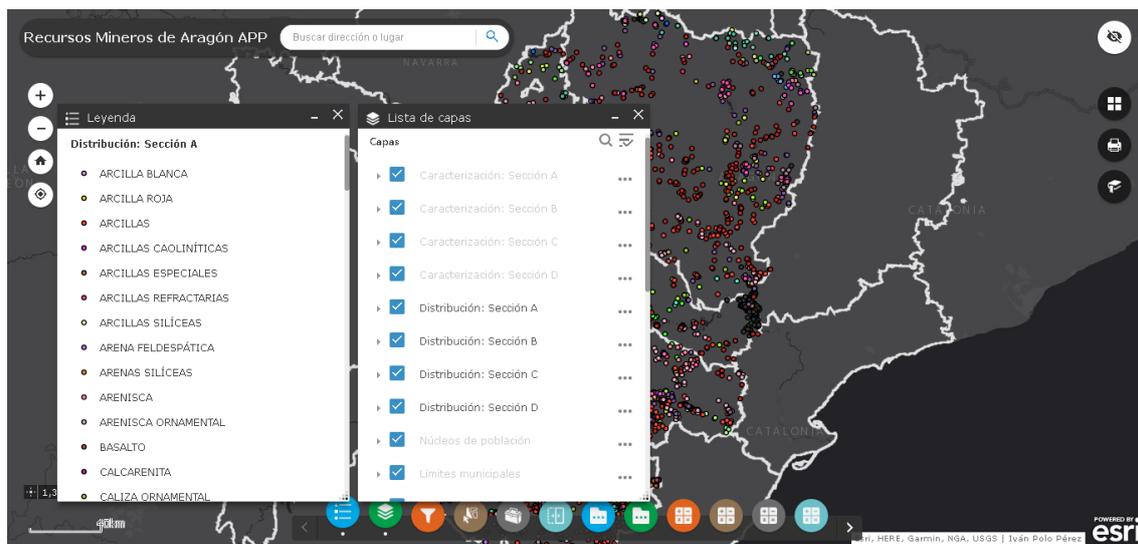
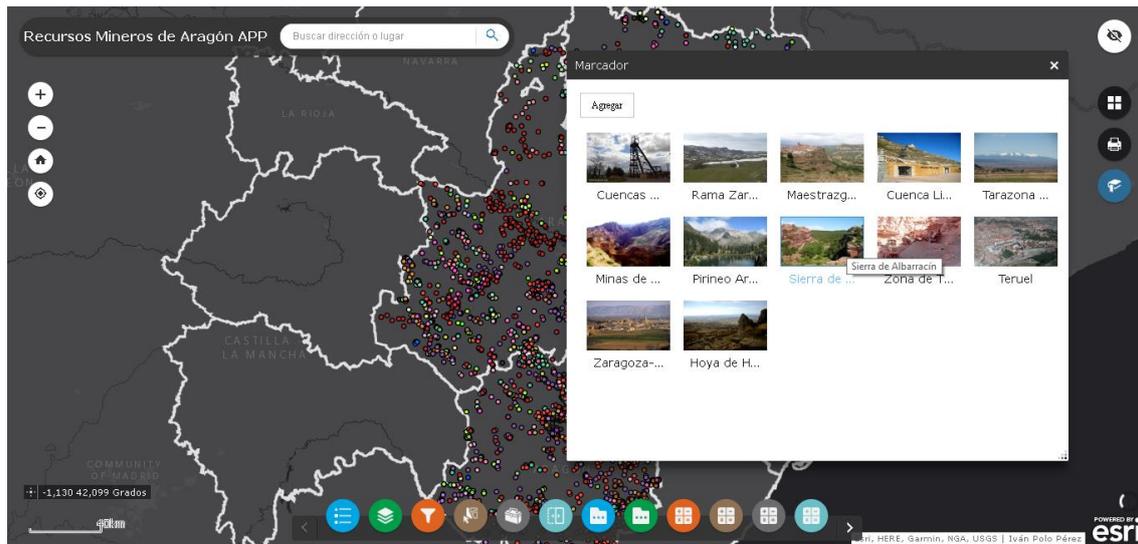


Figura Anexo II.3. Widgets Leyenda y Lista de capas. Elaboración propia.

En la aplicación serán incluidas, además, tres herramientas que ocupan una posición primordial. Una de ellas servirá para seleccionar el mapa de fondo que se mostrará en la aplicación, otra permitirá imprimir la pantalla, generando composiciones de mapa a partir de los datos mostrados, mientras que el último de estos *widgets* es empleado para el almacenamiento de marcadores. Los marcadores establecen un acceso rápido a algunas de las ubicaciones consideradas más interesantes, como áreas con una elevada concentración de recursos o zonas relevantes desde el punto de vista demográfico (Figura Anexo II.4.).

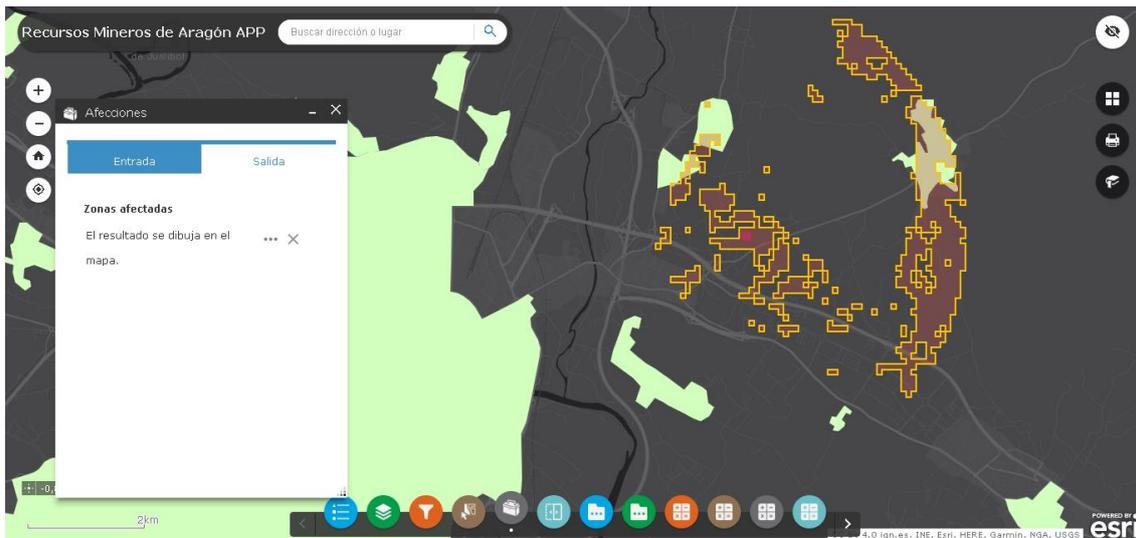


*Figura Anexo II.4. Galería de marcadores correspondientes a zonas mineras o con abundancia de recursos y a las capitales de provincia, con una imagen asignada a cada marcador. Elaboración propia.*

El resto de los *widgets* serán dispuestos en forma de barra en el margen inferior del mapa. Esta barra contendrá las herramientas que proporcionan una mayor capacidad de interacción con los datos almacenados en la aplicación. En los siguientes párrafos se analizarán las herramientas más interesantes de cara a la consulta de la información mostrada.

### **Afectaciones a la población**

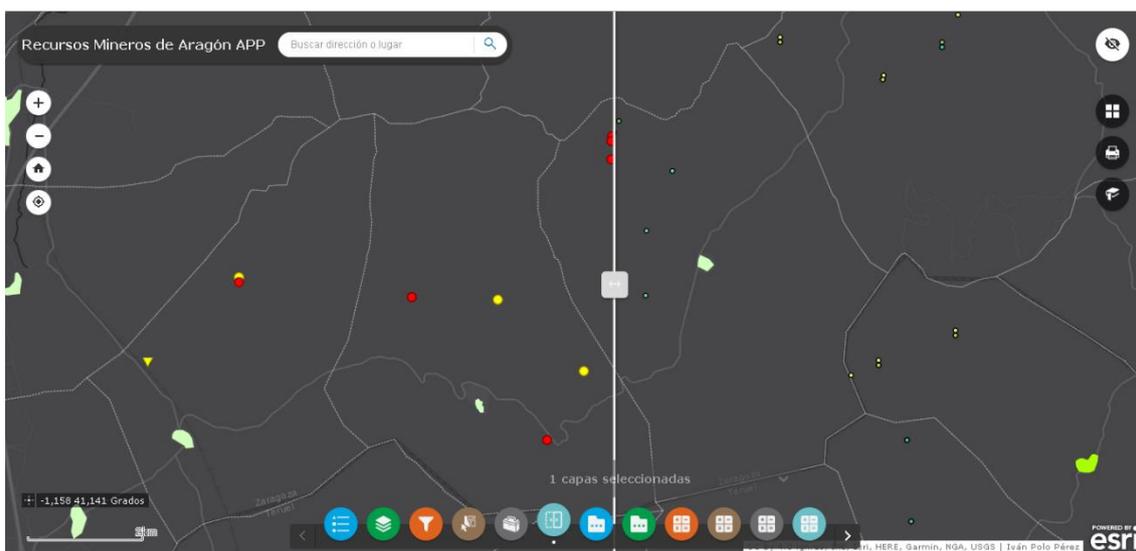
Una de estas herramientas permitirá conocer a partir de un punto determinado por el usuario, que podrá ser coincidente o no con un yacimiento o indicio mineral existente, las áreas que quedarían directamente expuestas en un radio de 5 km (Figura Anexo II.5.). Esta herramienta sigue un procedimiento similar al empleado en el indicador *Nivel de exposición de los núcleos de población*.



*Figura Anexo II.5. Área directamente expuesta a una hipotética explotación minera, simbolizada por un punto rosa, en el entorno de la ciudad de Zaragoza. Elaboración propia.*

### **Swipe**

La herramienta *swipe* permite realizar comparaciones rápidas entre dos capas (Figura Anexo II.6.). Aunque el usuario puede elegir las capas que desea visualizar, se ha establecido que la comparación se realice de forma automática entre la que contiene la distribución de los elementos y la que incluye la caracterización del interés minero.



*Figura Anexo II.6. Comparación entre la distribución de los diferentes registros en el territorio representados en función del elemento que representan y la caracterización según el interés y el estado de los mismos con la herramienta *swipe*. Elaboración propia*

## Dibujar

Otro de los *widgets* que se incorporaron a la aplicación sirve para realizar dibujos en el mapa, así como para efectuar medidas de áreas y distancias que se mantendrán de forma permanente en el mapa hasta que sean eliminadas manualmente (Figura Anexo II.7.). Esta herramienta es de gran utilidad, esencialmente, a la hora de crear esquemas, relaciones y mapas con anotaciones propias para la posterior impresión o exportación en otros formatos.

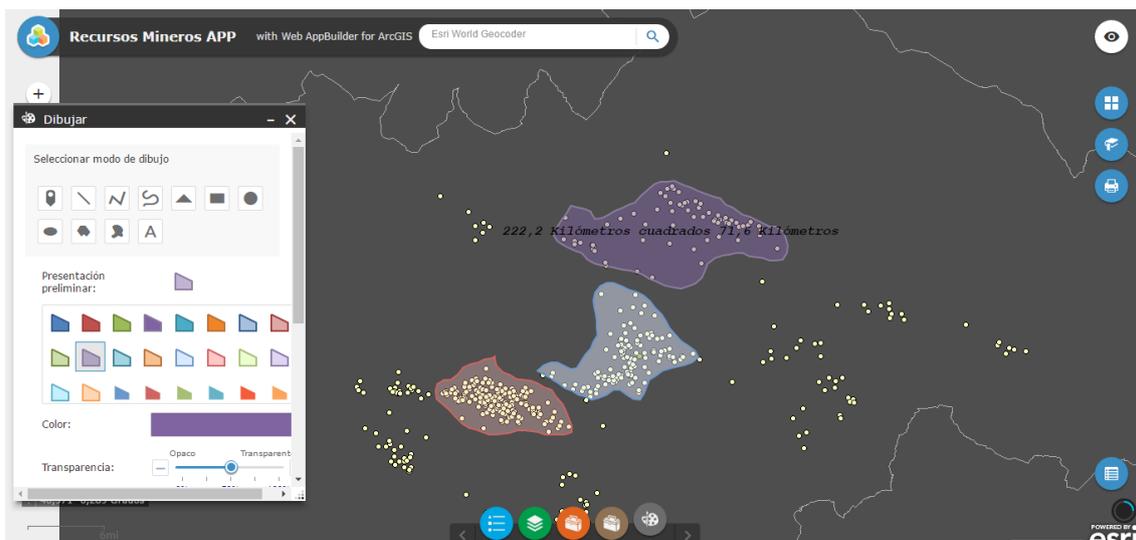


Figura Anexo II.7. Ejemplo de esquemas de agrupación de puntos y medidas realizados de forma manual con la herramienta dibujar.

## Indicaciones

Este *widget* (Figura Anexo II.8) calcula trayectos entre dos puntos especificados por el usuario, por lo que podría ser de utilidad a la hora de planificar una ruta para la visita de algunos de los puntos inventariados.

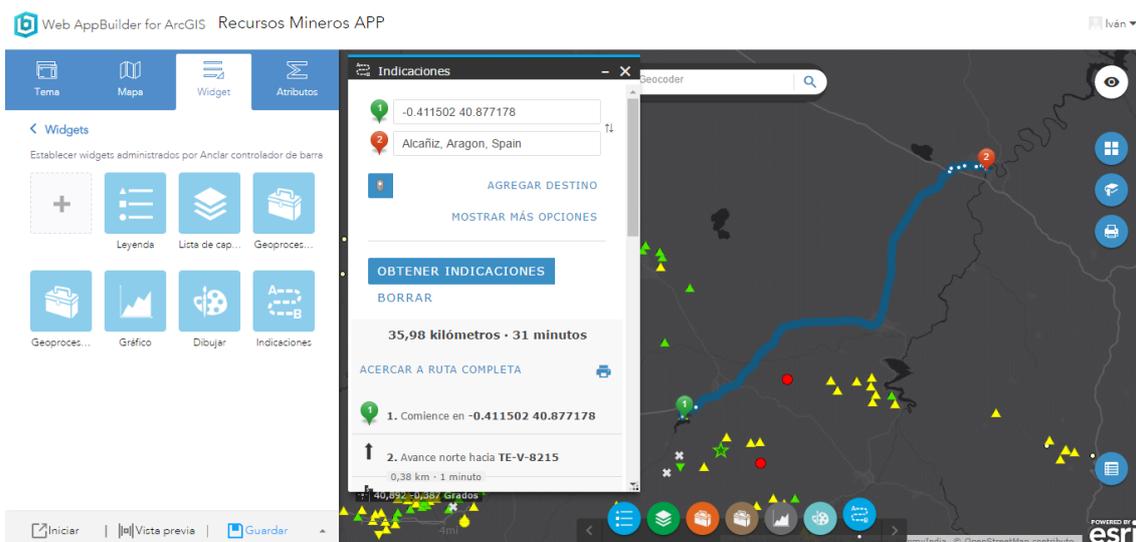


Figura Anexo II.8. Ejemplo de cálculo de ruta entre una población y un yacimiento.

### Near me

Un *widget* muy interesante es el que *Web AppBuilder* ha denominado como *Near me*. Esta herramienta muestra todas las entidades que se localizan en torno a una ubicación determinada por el usuario en un radio también elegido por el consumidor del producto. Esta herramienta será utilizada en dos vertientes diferentes. Por un lado, podrá ser utilizada para determinar los recursos minerales que se encuentran en torno a una localización concreta, como por ejemplo un núcleo de población (Figura Anexo II.9.).

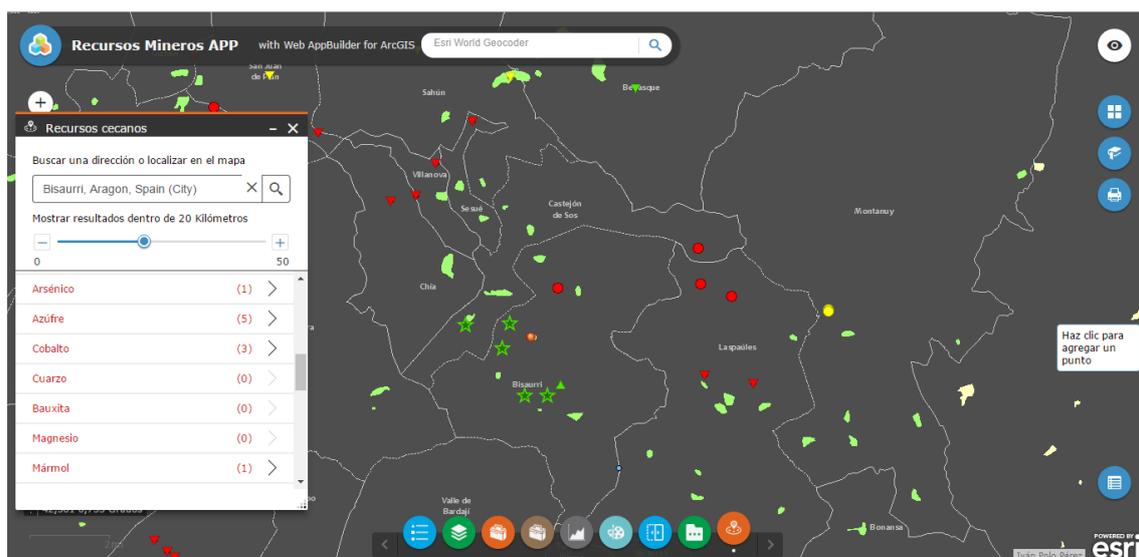


Figura Anexo II.9. El widget *Near me* crea una lista con todos los puntos inventariados en torno a una localización especificada por el usuario. Elaboración propia.

Esta herramienta también ordena los resultados de la búsqueda en función de la distancia respecto al punto introducido por el usuario, facilitando conocer cuales se encuentran más próximas a la ubicación seleccionada (Figura Anexo II.10.).

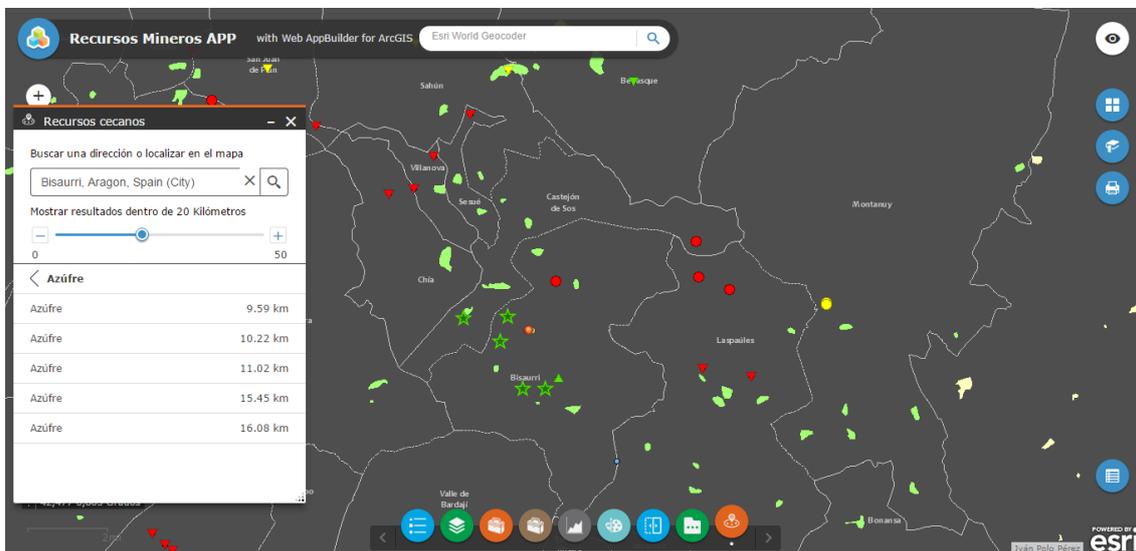


Figura Anexo II.10. El widget ordena los yacimientos/indicios de un determinado elemento en función de la cercanía a una ubicación propuesta por el usuario. Elaboración propia.

Por otro lado, la herramienta también permitirá actuar en sentido inverso, es decir, listando todas aquellas entidades que se encuentran en las proximidades del yacimiento (Figura Anexo II.11.).

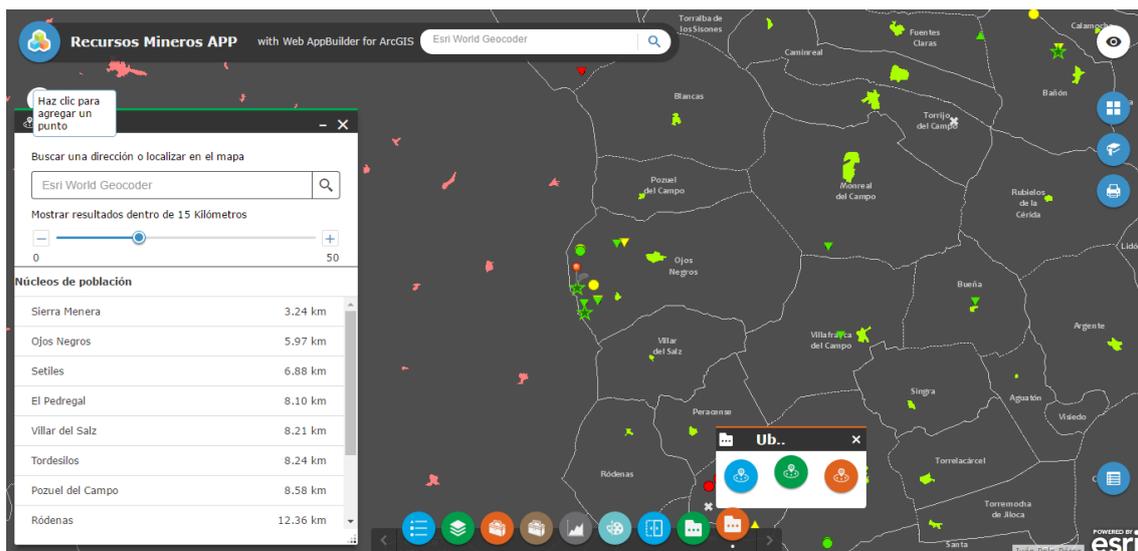


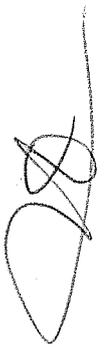
Figura Anexo II.11. Núcleos de población ordenados por su proximidad a un punto inventariado. Elaboración propia.

Anexo III: Convenio de colaboración entre el gobierno de Aragón, la universidad de Zaragoza y la Agrupación de Empresas Mineras de Aragón (AEMA) para el desarrollo de actividades investigadoras en el sector energético y minero de Aragón

**CONVENIO DE COLABORACIÓN ENTRE EL GOBIERNO DE ARAGÓN, LA UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA Y LA AGRUPACIÓN DE EMPRESAS MINERAS DE ARAGÓN (AEMA) PARA EL DESARROLLO DE ACTIVIDADES INVESTIGADORAS EN EL SECTOR ENERGÉTICO Y MINERO DE ARAGÓN.**

En Zaragoza, a 17 de octubre de 2014.

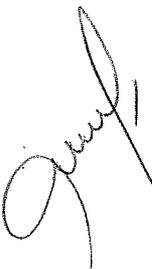
**REUNIDOS**



De una parte, el Excmo. Sr. Consejero de Industria e Innovación, D. Arturo Aliaga López, en virtud del Decreto de 30 de diciembre de 2011, de la Presidencia del Gobierno de Aragón, por el que dispone su nombramiento, actuando en nombre y representación del Gobierno de Aragón, según Acuerdo de este órgano de fecha 23 de septiembre de 2014.



De otra parte, D<sup>a</sup>. María Pilar Zaragoza Fernández, en nombre y representación de la Universidad de Zaragoza, con domicilio social en calle Pedro Cerbuna, 12, 50009 Zaragoza, provista de C.I.F. N<sup>o</sup> Q-5018001-G, en calidad de Vicerrectora de Transferencia e Innovación Tecnológica de la Universidad de Zaragoza, con autorización para la celebración de este acto según poderes otorgados por el Sr. Rector Magnífico de la Universidad de Zaragoza ante el Notario de Zaragoza D. Rafael Bernabé Panos, con fecha 18 de mayo de 2012 y número de protocolo 823.



De otra parte, D. Manuel Agenjo Perea, Presidente de la Agrupación de Empresas Mineras de Aragón (AEMA), en su nombre y representación, según nombramiento de la Asamblea Ordinaria Electiva de fecha 15 de marzo de 2013, con domicilio en la calle Sanclemente n<sup>o</sup> 22, 1<sup>o</sup> dcha, 50001 Zaragoza, y CIF G-99034894.

Las partes se reconocen mutuamente capacidad jurídica suficiente y poder bastante para obligarse en este convenio de colaboración, y a tal efecto,

**EXPONEN**

El Estatuto de Autonomía de Aragón, reformado por la Ley Orgánica 5/2007, de 20 de abril, atribuye a la Comunidad Autónoma de Aragón en su artículo 71.32<sup>a</sup> la competencia exclusiva sobre la planificación de la actividad económica y fomento del desarrollo económico de la Comunidad Autónoma, de acuerdo con los principios de equilibrio territorial y de sostenibilidad. Asimismo, el artículo

71.2ª del Estatuto reconoce competencia exclusiva en materia de aguas minerales y termales. Por su parte, el artículo 75.2ª del Estatuto reconoce la competencia compartida en materia de régimen minero, en especial, la regulación y el régimen de intervención de las minas y recursos mineros, así como la restauración de los espacios afectados por actividades extractivas. Igualmente, el citado artículo 75. 4º reconoce la competencia exclusiva en materia de energía, que comprende, en todo caso: la regulación de las actividades de producción, almacenamiento, distribución y transporte de cualesquiera energías, incluidos los recursos y aprovechamientos hidroeléctricos, de gas natural y de gases licuados; el otorgamiento de las autorizaciones de las instalaciones correspondientes existentes, cuando se circunscriban al territorio de la Comunidad y su aprovechamiento no afecte a otra Comunidad.

El ejercicio de las competencias en las materias citadas, que supone también el desarrollo de la actividad económica de tales sectores corresponde, en la actualidad, al Departamento de Industria e Innovación de acuerdo con lo dispuesto por el Decreto 27/2012, de 24 de enero, del Gobierno de Aragón, por el que se aprueba la estructura orgánica de dicho Departamento.

Por otra parte, la Universidad de Zaragoza es una Entidad de Derecho Público al servicio de la sociedad, que tiene, entre otras, las funciones de creación, desarrollo, transmisión y crítica de la ciencia, de la técnica y todas las manifestaciones de la cultura y el apoyo científico y técnico al desarrollo cultural, social y económico.

La Universidad de Zaragoza, para el cumplimiento de sus fines, lleva a cabo actividades de docencia, investigación, desarrollo científico y divulgación de la ciencia y la cultura. Por ello, es su voluntad atender cuantos requerimientos de colaboración tengan como finalidad llevar a cabo estos fines, como medio de incrementar el bienestar y desarrollo de los ciudadanos a quienes sirve.

Por último, la Agrupación de Empresas Mineras de Aragón (AEMA), tiene entre sus fines, la actuación de forma conjunta de las empresas en todas las acciones que redunden en el fomento de la minería, el desarrollo de nuevas tecnologías y el conocimiento de la actividad minera en Aragón.

En este contexto, el Departamento de Industria e Innovación en el ejercicio de sus competencias en las materias antes citadas ha tenido especial interés en apoyar todas las acciones llevadas a cabo en el campo de la investigación que pudieran repercutir en el mayor conocimiento de las características y potencialidades de sus recursos autóctonos con el objetivo claro de impulsar al sector energético y minero. Aragón cuenta con una gran riqueza natural en la que ha basado su desarrollo económico en el pasado y que debiera desempeñar un papel esencial para encarar el futuro con garantías y de forma sostenible. Es el caso de los recursos minerales, energéticos o hídricos y también de los que sustentan la obtención de energías renovables, incluida la disponibilidad de espacio o la calidad de su paisaje. Todos estos recursos abióticos y energéticos presentan un potencial aprovechamiento económico

para la Comunidad aragonesa. Además, al localizarse en zonas no urbanas, han desempeñado un papel fundamental en el desarrollo del tejido rural aragonés y deben seguir desempeñando dicha función en el futuro.

En virtud de lo anterior, se quiere abrir una línea de colaboración entre el Gobierno de Aragón, la Universidad de Zaragoza y la Agrupación de Empresas Mineras de Aragón, que sirva para un mejor conocimiento de los recursos abióticos de Aragón: sol, aire, agua, suelo, clima, relieve luz, ph; sus relaciones con el medio rural y sus oportunidades de desarrollo. Dichos objetivos se concretan inicialmente en la realización de la tesis doctoral "El futuro de los recursos abióticos y energéticos de Aragón. Escenarios y estrategias para la Ordenación del Territorio" que se realiza dentro del Programa de Doctorado en Ordenación del Territorio y Medio Ambiente (reconocido con la Mención hacia la Excelencia de la Agencia Nacional de Evaluación de la Calidad y la Acreditación) de la Universidad de Zaragoza. Será dirigida por el Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio de la Universidad de Zaragoza y por la Dirección del Instituto Mixto CIRCE (Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos) de la Universidad de Zaragoza.

Las partes intervinientes en este convenio consideran de gran interés la colaboración entre ellas, y se proponen realizar actuaciones conjuntas en las materias citadas, que sirvan a la docencia, a la investigación y a la difusión de los avances realizados en Aragón sobre estas cuestiones, así como de cualquier actividad que directa o indirectamente se relacione con este objetivo.

Por todo ello, las partes acuerdan las siguientes

## CLAUSULAS

### PRIMERA.- OBJETO

El objeto del presente Convenio es fijar la colaboración entre el Gobierno de Aragón, a través del Departamento de Industria e Innovación, la Universidad de Zaragoza y la Agrupación de Empresas Mineras de Aragón (AEMA), para el desarrollo de actividades investigadoras en el sector energético y minero de Aragón, dirigidas por el Instituto Mixto CIRCE (Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos) y el Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio de la Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad de Zaragoza.

### SEGUNDA.- COMPROMISOS DE LAS PARTES

El proyecto de actividades investigadoras sobre los recursos minerales y energéticos de Aragón, además de llevar a cabo acciones de investigación, supondrá la realización de acciones de información y difusión de resultados.

Por parte del Gobierno de Aragón, en el Departamento de Industria e Innovación, corresponderá ejercer las funciones derivadas de este convenio a la Dirección General de Energía y Minas. El Departamento de Industria e Innovación se compromete a prestar asistencia técnica y facilitar información a través de sus medios propios, sin ningún coste económico. La información proporcionada se referirá a las fuentes, documentos y cuestiones siguientes: Inventario de Espacios Degradados de Aragón, Registro del Derecho Minero, permisos de investigación solicitados en el último Concurso Minero, informes referentes a estudios sobre fractura hidráulica y posibles sumideros para la captura de CO<sub>2</sub> realizados en Aragón, publicaciones sobre Energía y Minería elaboradas por el Gobierno de Aragón; y otros informes, estudios o publicaciones sobre el tema en el ámbito territorial aragonés y que se consideren interesantes para la realización de la tesis. Además, se facilitará el contacto con otros miembros de la administración, principalmente responsables provinciales en temas mineros.

Por parte de la Universidad de Zaragoza, las tareas contempladas se enmarcan en la necesidad de profundizar en el estudio en Aragón de los recursos abióticos y energéticos. La investigación pretende establecer escenarios hipotéticos de futuro que tengan en cuenta diferentes contextos geopolíticos y tecnológicos, con el objetivo de determinar la mayor o menor viabilidad económica y estratégica de la explotación de los recursos abióticos y energéticos presentes en la Comunidad. Se estudiará la forma óptima de empleo de estos recursos, de forma sostenible y respetuosa con la naturaleza, y cómo éstos pueden contribuir al desarrollo aragonés y específicamente al de las áreas productoras. Por otra parte, puede ser susceptible de estudio la recuperación de antiguas explotaciones mineras, así como la reconversión económica de los territorios en los que la minería no sea ya una actividad rentable.

La Agrupación de Empresas Mineras de Aragón (AEMA) se compromete a hacer de nexo entre la Universidad, el equipo de investigación y las empresas del sector minero, facilitando toda la información disponible tanto de las explotaciones como de las empresas mineras en Aragón.

Los resultados obtenidos quedarán recogidos en una memoria. Igualmente la Universidad de Zaragoza se compromete a poner a disposición del Gobierno de Aragón y de la Agrupación de Empresas Mineras de Aragón los resultados de la investigación mediante monografías especializadas o en la forma que se considere apropiada.

### TERCERA.- NORMATIVA APLICABLE

Todas las actividades que se programen a través de este convenio, se realizarán ajustándose a la normativa vigente, especialmente en materia académica, económica y de personal, así como de protección de datos de carácter personal.

A tal efecto, resultará la aplicación la Ley Orgánica 6/2001, de 21 de diciembre, de Universidades, los Estatutos de la Universidad de Zaragoza, aprobados por Decreto 1/2004, de 13 de enero del Gobierno de Aragón y la Ley 5/2005, de 14 de junio, de Ordenación del Sistema Universitario de Aragón.

Sin perjuicio de cualquier otra normativa que resulte aplicable, será de aplicación a este Convenio la Ley 1/2011, de 10 de febrero, de Convenios de la Comunidad Autónoma de Aragón y la Ley 30/1992, de 26 de noviembre, de Régimen Jurídico de las Administraciones Públicas y del Procedimiento Administrativo Común.

#### **CUARTA.- COMISIÓN MIXTA DE SEGUIMIENTO**

A fin de procurar el desarrollo y seguimiento de este Convenio, se constituirá una Comisión Mixta formada por dos miembros en representación del Departamento de Industria e Innovación, dos miembros en representación de la Universidad de Zaragoza y dos miembros en representación de la Agrupación de Empresas Mineras de Aragón. La Comisión se constituirá en el plazo de un mes a partir de la entrada en vigor del presente Convenio y tendrá como finalidad promover las acciones que permitan cumplir los objetivos y condiciones estipulados en Convenio. Se reunirá con una periodicidad semestral y siempre que lo solicite una de las partes. En su primera reunión, la Comisión elegirá a la persona que la presida y la persona que levante las actas de sus reuniones. Al final de cada año elaborará una memoria de actividades.

#### **QUINTA.- VIGENCIA DEL CONVENIO**

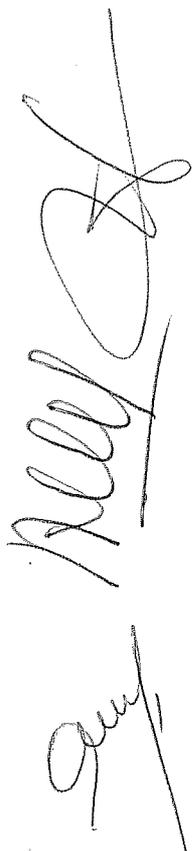
La duración del presente Convenio de Colaboración será de cuatro años desde su firma, prorrogable por periodos de igual duración, salvo voluntad de una de las partes manifestada fehacientemente a la otra con una antelación mínima de tres meses al vencimiento del mismo.

#### **SEXTA.- DEBER DE CONFIDENCIALIDAD**

Cada una de las partes se compromete a no difundir, bajo ningún aspecto, las informaciones científicas o técnicas pertenecientes a la otra parte a las que haya podido tener acceso en el desarrollo de este Convenio y sus posibles desarrollos, siempre que esas informaciones no sean de dominio público.

Los datos e informes obtenidos durante la realización del proyecto, así como los resultados parciales o finales, tendrán carácter confidencial hasta que la Comisión Mixta dé la conformidad para su publicación, en parte o en su totalidad en forma de artículos, conferencias, monografías, libros, etc.

La conformidad de la Comisión Mixta se deberá solicitar por escrito, mediante carta certificada dirigida a los miembros que representan a cada una de las



partes y por correo electrónico. La Comisión Mixta deberá responder en un plazo máximo de treinta días, comunicando su autorización, sus reservas o su disconformidad sobre la información contenida en la publicación. Transcurrido dicho plazo sin obtener respuesta, se entenderá que el silencio es la tácita autorización para su difusión. En el caso de la existencia de cualquier objeción, la publicación deberá modificarse hasta obtener el acuerdo favorable de la Comisión Mixta.

### **SÉPTIMA.- PUBLICIDAD**

En la publicidad de las actuaciones derivadas de este Convenio que se realicen en el ámbito de la Comunidad Autónoma de Aragón, será obligatoria la referencia a las entidades intervinientes, de acuerdo con sus respectivas normas de identidad corporativa.

### **OCTAVA.- NATURALEZA Y JURISDICCIÓN**

Las partes se comprometen a resolver de manera amistosa cualquier desacuerdo que pudiera surgir en el desarrollo del presente convenio, mediante su negociación en la Comisión Mixta.

Este Convenio tiene naturaleza administrativa siendo de los previstos en el artículo 4.1 c) del Texto Refundido de la Ley de Contratos del Sector Público, aprobado por el Real Decreto Legislativo 3/2011, de 14 de noviembre.

Las cuestiones que sobre la interpretación y cumplimiento de lo estipulado en el presente Convenio pudieran surgir entre las partes se dirimirán en el ámbito de la Comisión Mixta de Seguimiento, prevista en la cláusula cuarta.

En defecto de acuerdo entre las partes en el seno de la Comisión, la competencia de estas cuestiones litigiosas corresponderá al orden jurisdiccional contencioso-administrativo. A tal efecto, las partes acuerdan someterse a los Juzgados y Tribunales de la Ciudad de Zaragoza, con renuncia expresa a cualquier otro fuero que pudiera corresponderles.

### **NOVENA.- MODIFICACIÓN Y RESOLUCIÓN DEL CONVENIO**

1. Las Partes podrán resolver y/o modificar este Convenio en cualquier momento por común acuerdo.

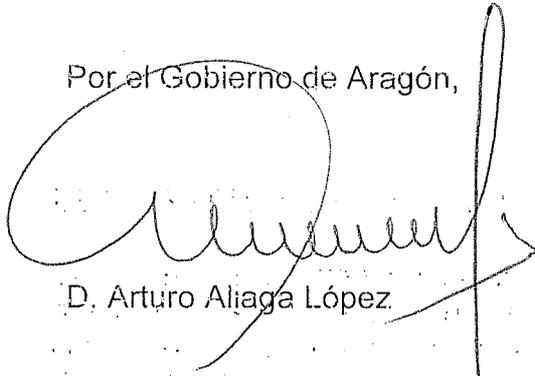
2. Si alguna de las partes estimase como inadecuada su presencia en el convenio colaboración, podrá retirarse del mismo preavisando a la otras partes con un plazo de dos meses y dejando concluidas cualesquiera tareas y compromisos que se hubieran comenzado con anterioridad a expresar su deseo de retirada.

## DÉCIMA.- PROPIEDAD DE LOS RESULTADOS

El régimen de propiedad y gestión de los resultados derivados de los proyectos desarrollados en el marco de las actuaciones investigadoras asociadas a este convenio, se acordará por unanimidad para cada acción específica que se desarrolle. Cualquier publicación que se genere como consecuencia de este convenio deberá contener al menos el logo de las entidades firmantes.

Y para que conste, y en prueba de conformidad, las partes firman por triplicado ejemplar el presente convenio de colaboración, en lugar y fecha expresados en el encabezamiento.

Por el Gobierno de Aragón,



D. Arturo Aliaga López

Por la Universidad de Zaragoza,



D.ª Pilar Zaragoza Fernández

Por la Agrupación de Empresas  
Mineras de Aragón,



D. Manuel Agenjo Perea

## Bibliografía

## BIBLIOGRAFÍA

- ¿Qué es la minería a cielo abierto? (2016). Recuperado de No a la Mina Esquel website: <https://noalamina.org/general/item/2720-que-es-la-mineria-a-cielo-abierto>
- Aduvire, O. (2016). *Drenaje ácido de mina. Generación y tratamiento*.
- AES Gener. (s. f.). *Electricity Transmission Lines S/S Maitenes - S/S Alfalfal & Alfalfal II Power Plant -S/S Alfalfal (Annex 8: Geology and geomorphology report)*.
- Agencia Reuters. (2019). U.S. and EU Concerned by Turkey's Plans to Drill Off Cyprus. (6 de mayo de 2019) *The New York Times*.
- Alegre Saura, E. (2019). Las cuencas mineras de Teruel claman por su futuro ante el cierre de la central térmica de Andorra. *eldiario.es*, (Sociedad).
- Alonso, R. N. (2010). *Minería para no mineros: lecciones básicas sobre minería y medio ambiente*. Mundo Editorial.
- Amadeo, K. (2019). OPEC Oil Embargo, Its Causes, and the Effects of the Crisis. The Truth About the 1973 Arab Oil Crisis. (30 de marzo de 2019). *The Balance*.
- ANEFA. (2012). Cuaderno de recomendaciones a las administraciones. En *Plan Estratégico 2012-2025 del Sector de los Áridos*.
- Angela Akanwa, O., Chike Mba, H., y Uloma Jibrum, U. (2017). *Effects of Quarrying Activities on Local Vegetation Cover in Ebonyi State , Nigeria*. (2).
- Arribas Navarro, D. (2015). *Facultat de Belles Arts de Sant Carles Departament d' Escultura Programa de Doctorado de Arte Público*. Universitat Politècnica de València.
- Arriols, E. (2018). Qué es la ecología industrial con ejemplos. Recuperado de <https://www.ecologiaverde.com/que-es-la-ecologia-industrial-con-ejemplos-1316.html>
- Atlas de Aragón. (s. f.). Recuperado de Idearagon: <https://idearagon.aragon.es/atlas/>

- Azcárate Luxán, B., Azcárate Luxán, M. . V., y Sánchez Sánchez, J. (2015). *Geografía regional del mundo. Desarrollo, subdesarrollo y países emergentes*. (Séptima re). Madrid: UNED.
- Aznalcóllar, una mina marcada por el desastre ecológico de Boliden de 1998. (13 de mayo de 2015). *El Periodico*.
- Badía, D., Ibarra, P., Longares, L. A., y Martí, C. (2007). La diversidad edáfica en Aragón. Actas XXVI Reunión de la S.E.C.S. Durango (Bizkaia). Recuperado de iArasol website: [www.suelosdearagon.com/contenido.php?padre=24%7C25&IDContenido=25](http://www.suelosdearagon.com/contenido.php?padre=24%7C25&IDContenido=25)
- Baker Hughes INTEQ. (1999). *Petroleum Geology*. Houston, TX, Estados Unidos.
- Baños, P. (2011). El espectro de los minerales estratégicos (I): Afganistán. *Instituto Español de Estudios Estratégicos, Abril 2011*.
- Baños, P. (2017). *Así se domina el mundo: Desvelando las claves del poder mundial*. (1ª edición). Editorial Planeta.
- Baños, P. (2019). *El dominio mundial. Elementos del poder y claves geopolíticas* (4ª edición). Ariel.
- Batelaan, O., y De Smedt, F. (2007). GIS-based recharge estimation by coupling surface-subsurface water balances. *Journal of Hydrology*, 337(3-4), 337-355.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.02.001>
- Bateman, A. M. (1951). *The formation of mineral deposits*. Nueva York: John Wiley and Sons.
- Bennet, L., Le Calvez, J., Sarver, D. R. R., Tanner, K., Birk, W. S. S., Waters, G., ... Primiero, P. (2005). The Source for Hydraulic Fracture Characterization. *Oilfield Review*, 42-57.
- Betancour, M. C. (2018). Consumo y desafíos en el uso de agua en la minería. *Octavo Seminario de Estudiantes de Metalurgia Extractiva Pontificia Universidad Católica de Valparaíso*, p. 42.
- Bjørlykke, K. (2013). Petroleum geoscience. En *Choice Reviews Online* (2ª Edición, Vol. 41).  
<https://doi.org/10.5860/choice.41-4685>

- Blasco, E. J. (25 de febrero de 2014). EE.UU. se acerca a la independencia energética gracias al «fracking» ABC, (Economía).
- Bordonaba, A. P., y Aurell, M. (2002). de la Cordillera Ibérica : Análisis de facies y establecimiento de secuencias. *Journal of Iberian Geology*, 28(January 2015), 31-44.
- Boyer, C., Clark, B., Jochen, V., Lewis, R., y Dallas, C. K. M. (2011). Shale Gas: A Global Resource. *Oilfield Review*, 23(3), 28-39.
- Bronstein, V. (2008). Energía, civilización y poder: La era del petróleo. *Encrucijadas*, (45), 6.
- Bustillo, M., y López Jimeno, C. (1997). *Manual de evaluación y diseño de explotaciones mineras*. Madrid: Entorno Gráfico.
- Bustillo, M., y López Jimeno, C. (2000). *Recursos Minerales. Tipología, prospección, evaluación, explotación, mineralurgia e impacto ambiental*. (Segunda ed; Carlos López Jimeno, Ed.). Madrid: U.D. Proyectos.
- Calvo, M. (2006). *Minerales de Aragón*. Zaragoza: PRAMES.
- Canudo, J. I. (2007). La Paleontología en la comarca de las Cuencas Mineras. En: Comarca de las Cuencas Mineras. *Colección Territorio*, 57-63.
- Carrizosa, E. (2005). Algunas aportaciones de la investigación operativa a los problemas de localización. *Geofocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología e la Información Geográfica.*, 5, 268-277.
- Castel, L. (16 de enero de 2019). Los mineros vuelven a quemar neumáticos en Andorra. *La Comarca*.
- Cazal, S., y Betzabé Piña, A. (2015). *Criterios para la Explotación Racional de Yacimientos*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4891.7846>
- Centro Nacional de Información Geográfica. (2015). *Peligrosidad sísmica de España. PGA. Periodo de retorno 475 años*.

CESEDEN, M. del. (2010). *La importancia geoestratégica del África Subsahariana*. Ministerio de Defensa (Gobierno de España).

Comisión Europea. (2011). *Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social y al Comité de las Regiones: Abordar los retos de los mercados de los productos básicos y de las materias primas*. Bruselas.

Comisión Europea. (2014a). *Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social y al Comité de las Regiones sobre la revisión de la lista de las materias primas fundamentales para la UE y la aplicación de la iniciativa de materias primas*.

Comisión Europea. (2014b). *Evaluation and Exchange of Good Practice For the Sustainable Supply of Raw Materials within the EU*.

Comisión Europea. (2017a). *Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social y al Comité de las Regiones relativa a la lista de 2017 de materias primas fundamentales para la UE ES*.

Comisión Europea. (2017b). *JRC Technical reports - Assessment of the Methodology for Establishing the EU List of Critical Raw Materials - Annexes*.

<https://doi.org/10.2760/73303>

Comisión Europea. (2017c). *Study on the review of the list of Critical Raw Materials Critical Raw Materials Factsheets*. En *European Commission*. <https://doi.org/10.2873/876644>

Comisión Europea. (2018). *Report on Critical Raw Materials and the Circular Economy*. En *Comisión Europea*. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.126.1.78>

Comisión Europea. (2019). *Critical Raw Materials*. Recuperado de [http://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical\\_es](http://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_es)

Crespo, A., y Rodrigo, A. (2008). *Riesgos geológicos: minimizándolos maximizando la concienciación*. En Instituto Geológico y Minero de España (Ed.), *Exposición Planeta Tierra* (pp. 20-28).

Cruden, D. M., y Varnes, D. J. (1996). Landslides: investigation and mitigation. Chapter 3- Landslide types and processes. *Special Report - National Research Council, Transportation Research Board, 247*(August), 36-75.

D'Esposito, S. (2000). The Corporate Ethics Monitor Is Mining Sustainable? *Ethicscan Canada Limited, 12*(4), 4-6.

de Benito, E. (6 de octubre 2010). Catástrofe química en Hungría. *El País*, (Sociedad).

Departamento de Desarrollo Rural y Sostenibilidad. (2015a). DECRETO 274/2015, de 29 de septiembre, del Gobierno de Aragón, por el que se crea el Catálogo de Lugares de Interés Geológico de Aragón y se establece su régimen de protección. *Boletín Oficial de Aragón (BOA)*, 213, 33278-33551.

Departamento de Desarrollo Rural y Sostenibilidad. (2015b). DECRETO LEGISLATIVO 1/2015, de 29 de julio, del Gobierno de Aragón, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Espacios Protegidos de Aragón. *Boletín Oficial de Aragón (BOA)*, 35.

Departamento de Hacienda y Administración Pública y de Agricultura Ganadería y Medio Ambiente. (2015). DECRETO 27/2015, de 24 de febrero, del Gobierno de Aragón, por el que se regula el Catálogo de árboles y arboledas singulares de Aragón. *BOA (Boletín Oficial de Aragón)*, 43, 7557-7564.

Departamento de Medio Ambiente. (2010a). DECRETO 204/2010, de 2 de noviembre, del Gobierno de Aragón, por el que se crea el Inventario de Humedales Singulares de Aragón y se establece su régimen de protección. *BOA (Boletín Oficial de Aragón)*, 220, 25386-25400.

Departamento de Medio Ambiente. (2010b). RESOLUCIÓN de 30 de junio de 2010, de la Dirección General de Desarrollo Sostenible y Biodiversidad, por la que se delimitan las áreas prioritarias de reproducción, alimentación, dispersión y concentración local de las especies de aves incluidas en el Cat. *Boletín Oficial de Aragón (BOA)*, 154, 19237-19238.

Departamento de Política Territorial e Interior. (2014). 10. recursos y condicionantes naturales. En *Estrategia de Ordenación Territorial de Aragón. Monografía I.10.* (pp. 1-34).

- Department of Industry Innovation and Science. (s. f.). Sustainable mining. What is sustainable mining? Recuperado de Australian Government website: <https://archive.industry.gov.au/resource/Sustainable-mining/Pages/default.aspx>
- Dicken, P., y Lloyd, P. E. (1990). *Location in Space: Theoretical Perspectives in Economic Geography*.
- Dirección General de Ordenación del Territorio. (2015). *Mapa de calidad del paisaje de Aragón escala 1:100.000*.
- Dollar, D. (22 de marzo de 2018). *La inversión china en América Latina continúa creciendo*. Brookings
- Dubiński, J. (2013). Sustainable Development of Mining Mineral Resources. *Journal of Sustainable Mining*, 12(1), 1-6. <https://doi.org/10.7424/jsm130102>
- EFE, A. (27 de diciembre de 2017). Un experto afirma que la minería del siglo XXI debe asumir sus costes ambientales. *El Periódico de Aragón*, (Medio Ambiente).
- El sector de las arcillas en la provincia de Teruel*. (2006). Zaragoza: Gobierno de Aragón, Departamento de Industria, Comercio y Turismo.
- ELAW. (2010). *Guía Para Evaluar EIAs de Proyectos Mineros* (1era Edici). Eugene (OR, Estados Unidos): Environmental Law Alliance Worldwide.
- Energía, S. de E. de. (2016). *Estadística Minera de España*. Madrid: Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital.
- Energy Institute. (2015). A guide to shale gas Energy Essentials. En *Energy Institute* (1ª Edición). London: Energy Institute.
- Erenovable. (2017). Subestaciones eléctricas ¿Qué son y para qué sirve? Recuperado de Erenovable.com website: <https://erenovable.com/subestaciones-electricas/>

- ESRI. (2016a). Cómo funciona IDW. Recuperado de ArcGIS for Desktop website: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-idw-works.htm>
- ESRI. (2016b). Un recorrido rápido por el uso de iteradores. Recuperado de ArcGIS for Desktop website: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/analyze/modelbuilder/a-quick-tour-of-using-iterators-for-iteration-looping-.htm>
- ESRI España. (2015a). *Análisis de redes y solucionador de rutas*.
- ESRI España. (2015b). *Conceptos Básicos de ModelBuilder*.
- ESRI España. (2015c). *Fuentes para la adquisición de datos espaciales*.
- ESRI España. (2015d). *Introducción a los Sistemas de Información Geográfica*.
- ESRI España. (2015e). *Principios de Geografía y Cartografía*.
- ESRI España. (2015f). *Trabajar con variables en línea en ModelBuilder*.
- ESRI España. (2015g). *Utilidades de un SIG : campos de aplicación*.
- Estadística de Castilla y León. (2015). *Ficha Municipal*.
- Explicación del Mapa de Rocas y Minerales Industriales de Aragón. E. 1:300.000*. (1996).
- Flores Gamboa, S., y Leyva López, J. C. (2015). *Análisis multicriterio para la toma de decisiones en el sector turístico : un acercamiento teórico-conceptual*. (January).
- Fornillo, B. (2014). ¿Commodities, bienes comunes o recursos estratégicos? La importancia de un nombre. *Nueva Sociedad*, (252), 101-117.
- Fundamentals of Petroleum Geology*. Halliburton Company (1999).
- García Tasich, S. (2017). Recursos naturales estratégicos. *Instituto Español de Estudios Estratégicos*.
- Gilblom, K., y Patel, T. (22 de noviembre de 2016). Fracking in Europe. *Bloomberg*, (Quicktake).

- Gobierno de Aragón. (2007). *Catálogo de Especies Amenazadas en Aragón*.
- Gobierno de Aragón. (2019). Sistema Información Geográfica Identificación Parcelas Agrarias en Aragón (SIGPAC). Recuperado de <http://sigpac.aragon.es/visor/>
- Gocht, W. R., Zantop, H., y Eggert, R. G. (1988). *International Mineral Economics. Mineral Exploration, Mine Valuation, Mineral Markets, International Mineral Policies*. Berlin: Springer.
- Gómez Orea, D. (2002). *Marco conceptual de la Ordenación Territorial*.
- Gooldchild, M. F., y Kemp, K. K. (1991). *Introduction to GIS*. Santa Barbara.
- Gutiérrez Elorza, M. (2008). *Geomorfología*. Prentice Hall.
- Hannis, S., y Bide, T. (2009). Cobalt: Definition, mineralogy and deposits. *Minerals UK*, (August).
- Hartman, H. L., y Mutmanky, J. M. (2002). Introductory Mining Engineering. En *Civilization*. Wiley.
- Heinberg, R. (2006). *Se acabó la fiesta. Guerra y colapso económico en el umbral del fin de la era del petróleo* (1ª Edición; Ediciones Montañas y Hombres S.L.U., Ed.). Benasque: Barrabes Editorial.
- Hernández Carrión, J. R., y Pastor, V. J. (2009). *Introducción a la economía y la hacienda pública: Tema 4. Elasticidad. Oferta y demanda*.
- Higueras, P. (s. f.). Blog: Yacimientos Minerales. Recuperado de Universidad de Castilla-La Mancha website: <https://blog.uclm.es/pablohigueras/yacimientos-minerales/>
- Higueras, P., y Oyarzun, R. (s. f.). Curso de minería y medio ambiente. Recuperado de Blog Universidad Castilla-La Mancha website: <https://blog.uclm.es/pablohigueras/curso-de-mineria-y-medio-ambiente/>
- IIK. (2019). *Conflict Barometer 2018*.

Hilyard, J. F. (2012). *The Oil & Gas Industry. A Nontechnical Guide*. (S. Hill, Ed.). Tulsa, Oklahoma 74112-660 USA: PennWell.

Hydraulic Fracturing: The Process. (2010). Recuperado de FracFocus website:  
<https://fracfocus.org/hydraulic-fracturing-how-it-works/hydraulic-fracturing-process>

IAEST. (2017). *Datos fundamentales del sector minero. Aragón y provincias, España. Años 1994-2015 (Utilización de recursos naturales)*.

IAEST. (2019). *Estadística Local*.

IDEARAGON. (2015). Descargas. Recuperado de <https://idearagon.aragon.es/descargas>

IECA. (2017). ¿Qué es un servicio WMS? Recuperado de Blog: Estadística y Cartografía de Andalucía. Junta de Andalucía. website:  
<http://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/blog/2017/02/que-es-un-servicio-wms/>

IGME. (s. f.-a). *Mapa de Rocas y Minerales Industriales 1:200.000. Hoja 32. Zaragoza*.

IGME. (s. f.-b). *Mapa de Rocas y Minerales Industriales 1:200.000. Hoja 47. Teruel*.

IGME. (1979). *Mapa Geológico de España. E: 1.50.000. N° 519 (Aguaviva)*. Madrid.

IGME. (1982). *Mapa Geológico de España. E: 1.50.000. N° 179 (Bielsa)* (1ª edición). Madrid.

IGME. (1983a). *Mapa Geológico de España. E: 1.50.000. N° 565 (Tragacete)* (1ª edición). Madrid.

IGME. (1983b). *Mapa Geológico de España. E: 1.50.000. N° 567 (Teruel)*.

IGME. (1983c). *Mapa Geológico de España. E: 1.50.000. N° 590 (La Puebla de Valverde)*.

IGME. (1989a). *Mapa Geológico de España. E: 1.50.000. N° 145 (Sallent)* (1ª edición). Madrid.

IGME. (1989b). *Mapa Geológico de España. E: 1.50.000. N° 466 (Moyuela)* (1ª edición). Madrid.

- IGME. (1991). *Mapa de Rocas y Minerales Industriales 1:200.000. Hoja 47. Daroca.*
- IGME. (1993). *Estudios de viabilidad en proyectos mineros* (Ministerio de Industria y Energía, Ed.). Madrid: ADOSA.
- IGME. (1997a). *Mapa Geológico de España. E: 1.50.000. N° 415 (Mequinzenza).* Madrid.
- IGME. (1997b). *Mapa Geológico de España. E: 1.50.000. N° 443 (Fabara)* (1ª edición).  
<https://doi.org/8478403043>
- IGME. (2002). *Mapa Geológico de España. E: 1.50.000. N° 180 (Benasque)* (1ª edición). Madrid.
- IGME. (2003). MAGNA 50 - Mapa Geológico de España a escala 1:50.000 (2ª Serie).  
Recuperado de <http://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/Magna50.aspx>
- IGME. (2014a). Base de Datos de Indicios o explotaciones de Rocas y Minerales Industriales.  
Recuperado de Servicio WMS website:  
[http://mapas.igme.es/gis/services/BasesDatos/IGME\\_BDMIN\\_Indicios/MapServer/WMSServer](http://mapas.igme.es/gis/services/BasesDatos/IGME_BDMIN_Indicios/MapServer/WMSServer)
- IGME. (2014b). Base de Datos de Metalogenia (Yacimiento e Indicios Minerales).
- InflationData.com. (2019). Historical Crude Oil Prices. Recuperado de  
<https://inflationdata.com/articles/inflation-adjusted-prices/historical-crude-oil-prices-table/>
- Institut national de la statistique et des études économiques. (2015). Population en 2013. Recensement de la population. Recuperado de <https://insee.fr/fr/accueil>
- Instituto Aragonés del Medio Ambiente. (1993). Sistema de Información sobre Recursos y Medio Ambiente.
- Instituto de Estadística de Castilla-La Mancha. (2015). *Cifras Oficiales de Población a 1 de Enero de 2015.*

- Instituto de Estadística de Cataluña. (2016). Municipios. Por tramos de población. Comarcas y Aran, ámbitos y provincias. En *Población*.
- Instituto de Estadística de La Rioja. (2015). *Población residente (La Rioja / España) por sexo y edad*.
- Instituto de Estadística de Navarra. (2015). *Evolución de la población según municipios y por sexo, según municipios*.
- Instituto Geográfico Nacional. (2011). *Base Cartográfica Nacional*.
- International Institute for Environment and Development (IIED). (2002). *Abriendo Brecha: Minería, Minerales y Desarrollo Sostenible*. 637.
- iUNIZAR. (17 de octubre de 2014). El Departamento de Industria e Innovación colabora con la Universidad de Zaragoza y las empresas mineras para investigar sobre los recursos existentes en Aragón. *Boletín diario informativo de la Universidad de Zaragoza*.
- Jefatura del Estado. (1973). *Ley 22/1973, de 21 de julio, de Minas*.
- Jefatura del Estado. (2007). Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad. *Boletín Oficial del Estado*, 1-117.
- Junta de Andalucía. (2013). *Diagnóstico sobre la situación del sector minero andaluz y sus tendencias como base de apoyo a la redacción de la estrategia minera de Andalucía 2014-2020*. Consejería de Economía, Innovación, Ciencia y Empleo.
- Keller, E. A., y Blodgett, R. H. (2004). *Riesgos naturales. Procesos de la Tierra como riesgos, desastres y catástrofes*. Madrid: Pearson Educación, S.A.
- King, G. E. (2012). Hydraulic Fracturing 101: What Every Representative, Environmentalist, Regulator, Reporter, Investor, University Researcher, Neighbor and Engineer Should Know About Estimating Frac Risk and Improving Frac Performance in Unconventional Gas and Oil Wells. En *SPE International*.

- Kogel, J. E., Trivedi, N. C., Barker, J. M., y Krukowski, S. (2006). *Industrial Minerals & Rocks: Commodities, Markets, and Uses*. Littleton, Colorado (Estados Unidos): Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.
- Kuby, M., Harner, J., y Gober, P. (2000). *Human Geography in Action*.
- La Minería de Aragón*. (1994). Diputación General de Aragón. Departamento de Industria, Comercio y Turismo.
- Lakshmi Steinberg, S., y Steinberg, S. J. (2015). *GIS Research Methods. Incorporating Spatial Perspectives*. (1ª Edición). Redlands, California: Esri Press.
- Lamelas García, M. T. (2018). Aplicación de técnicas de análisis multicriterio a la localización óptima de extracciones de arenas y gravas en el entorno de Zaragoza. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (66), 25-48. <https://doi.org/10.21138/bage.1778>
- Learning for sustainability. (s. f.). Social license to operate. Recuperado de <http://learningforsustainability.net/social-license/>
- LEGISLACIÓN CONSOLIDADA Ley 3/1999, de 10 de marzo, del Patrimonio Cultural Aragonés. (1999). *Boletín Oficial del Estado*, 88, 1-39.
- Ley 15/2006, de 28 de diciembre, de Montes de Aragón. (2006). *BOA (Boletín Oficial de Aragón)*, 124.
- Lilic, N., Cvjetic, A., Knezevic, D., Milisavljevic, V., y Pantelic, U. (2018). Dust and Noise Environmental Impact Assessment and Control in Serbian Mining Practice. *Minerals*, 8(2), 34. <https://doi.org/10.3390/min8020034>
- Lillo, J. (s. f.). *Impactos de la minería en el medio natural*.
- Llamas en el agua: la prueba que confirma lo peligrosa que es la contaminación por «fracking». (2016). *ABC*, (Sociedad).
- López-Davadillo Larrea, J., y Martín Roda, E. M. (2012). *GEOPOLÍTICA: Claves para entender un mundo cambiante* (1ª edición). Madrid: Editorial Universitaria Ramón Areces.

Los impactos de la minería. (s. f.). Recuperado de #ConflictsMinerals website:

<http://conflictminerals.es/es/los-impactos-de-la-mineria/>

MapCruzin. (s. f.). France Roads. Recuperado de Free France ArcGIS Shapefile Map Layers

website: <https://mapcruzin.com/free-france-arcgis-maps-shapefiles.htm>

Martín, F. L., Mollet, M. C., y Prats, J. M. C. (2007). *Atlas climático de Aragón*. Gobierno de Aragón (Departamento de Medio Ambiente).

Martínez, A., Martínez, P., y Gavín, E. (2008). *Evaluación del II Plan Autonómico de Investigación, Desarrollo y Transferencia del Conocimiento de Aragón (II PAID)*. 67.

Minerals UK. (2017). What is the difference between resources and reserves? Recuperado de <https://www.bgs.ac.uk/mineralsUK/mineralsYou/resourcesReserves.html>

Minéraux métallifères. (2019). Recuperado de Ministère de L'Énergie, du Développement du Nord et des Mines. Ontario. website: <https://www.mndm.gov.on.ca/fr/mines-et-des-mineraux/geologie/mineraux-metalliferes>

Ministerio de Hacienda. Gobierno de España. (s. f.). Difusión de datos catastrales. En *Sede Electrónica del Catastro*.

Ministerio de la Presidencia. (2008). *Real Decreto 1074/2002, de 18 de octubre, por el que se regula el proceso de elaboración, circulación y comercio de aguas de bebida envasadas*.

Ministerio para la Transición Ecológica. Gobierno de España. (2015). Búsqueda Alfanumérica. Recuperado de Catastro Minero website: <https://geoportal.minetur.gob.es/CatastroMinero/BusquedaAlfanumerica>

Ministerio para la Transición Ecológica. (2006). *Mapa Forestal de España (MFE50)*. Gobierno de España.

Mora, M. (24 de enero de 2013). Fuerzas especiales francesas protegen las minas de uranio en Níger. *El País*.

- Moreno Jimenez, A. (2008). *Sistemas y Análisis de la Información Geográfica. Manual de autoaprendizaje con ArcGIS*.
- Muñoz, B., y Romana, M. (2016). Aplicación de métodos de decisión multicriterio discretos al análisis de alternativas en estudios informativos de infraestructuras de transporte. *Pensamiento Matemático*, 6(2), 27-45.
- OECD. (2006). *The New Rural Paradigm: Policies and Governance*.
- Ordóñez, P., Quentin, E., y Cabrera, P. (2015). *Propuesta de metodología Geomática basada en evaluación multicriterio para el trazado de ductos petroleros*. 47(1), 1-20.  
<https://doi.org/10.1037/a0023865>.Early
- Oyarzún, J., y Oyarzun, R. (2011). Minería Sostenible : Principios y Prácticas. En *Ediciones GEMM - Aula2punto.net*. <https://doi.org/10.1007/s00402-014-2018-4>
- Oyarzún, J., y Oyarzun, R. (2014). *Léxico de Geología Económica Términos de uso común en España e Iberoamérica*.
- Oyarzun, R. (2011). Introducción a la Geología de Minas. En *GEMM - Aula2punto.net*.
- Oyarzun, R., Higuera, P., y Lillo, J. (2011). *Minería Ambiental. Una introducción a los Impactos y su Remediación*. Ediciones GEMM.
- Oyarzun, R., Higuera, P., y López García, J. A. (2010). *Yacimientos Minerales , Minería y Producción de Metales : de la Naturaleza al Consumidor*. (C), 1-6.
- Page, D. (29 de octubre 2014). El petróleo barato pone en peligro la revolución mundial del 'fracking'. *Expansión.com*, (Energía).
- Paneles fotovoltaicos: ¿Cuáles de sus materiales son recuperables? (2017). *ABC*, (Vivir).
- Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido: normativa. (s. f.). Recuperado de Ordesa.com website: <https://www.ordesa.net/parque-nacional/normativa>

- Peña, J. ., y Lozano, M. . (2004). Las unidades del relieve aragonés. *Geografía física de Aragón. Aspectos generales y temáticas.*, 1-14.
- PERC. (2013). *PERC REPORTING STANDARD 2013 Table of Contents*. 1-61.
- Pérez Boned, P. (20 de julio de 2015). Pyrsa , la mayor empresa del Jiloca , cumple 25 años. *Diario de Teruel*.
- Pérez Ventura, J. (2012). Minerales codiciados. Recuperado de El Orden Mundial: Economía y Desarrollo website: <https://elordenmundial.com/minerales-codiciados/>
- Peris Torner, J. (2012). Ferrocarril de Utrillas a Zaragoza – Minas y Ferrocarril de Utrillas , S.A. (MFU). Recuperado de [www.spanishrailway.com](http://www.spanishrailway.com) website: <https://www.spanishrailway.com/ferrocarril-de-utrillas-a-zaragoza/>
- Planelles, M. (14 de marzo de 2017). Spain’s fracking bubble bursts. *El País*, (Energy).
- Portal Estadístico de la Generalitat Valenciana. (2015). Estimación de la población empadronada por códigos postales. En *Información estadística*.
- Prud’Homme, A. (2014). *Hydrofracking. What everyone needs to know* (Oxford University Press, Ed.). New York.
- Rajadel, L., y Moreno, M. A. (12 de noviembre de 2018). Oposición vecinal al proyecto para abrir una mina de carbón entre Aguatón, Bueña y Visiedo. *Heraldo de Aragón*.
- Regueiro y González Barros, M. (2014a). Minerales críticos en Europa : metodología para la evaluación de la criticidad de los minerales. *IGME*.
- Regueiro y González Barros, M. (2014b). Minerales críticos en Europa : metodología para la evaluación de la criticidad de los minerales. *Revista de la Sociedad Española de Mineralogía*, nº19, 9.
- Regueiro y González Barros, M., y Marchán Sanz, C. (2004). *La industria española de las rocas y minerales industriales*.

- Report of the World Commission on Environment and Development.* (1987).
- Restrepo Baena, O. J., Bustamante Rúa, M. O., y Gaviria Cartagena, A. C. (2008). *Notas de clase de la asignatura: Pirometalurgia.* Medellín.
- Rodríguez-López, J. P., Meléndez, N., Soria, A. R., y L. de Boer, P. (2009). Reinterpretación estratigráfica y sedimentológica de las formaciones Escucha y Utrillas de la Cordillera Ibérica. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 22, 163-219.
- Rubio Navas, J., Corral Lledó, M. del M., Alberruche del Campo, E., Marchán Sanz, C., y Pérez Cerdán, F. (2012). *Libro Blanco de la Minería de Aragón.* Madrid: Servicio de Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Gobierno de Aragón.
- Runge, I. (2012). *International Mining Conference and Investors Forum Mining Economics.* 1-8.
- Sánchez de la Cruz, D. (2 de mayo de 2019). La producción de petróleo en EEUU registra un nuevo récord gracias al fracking. *Libre Mercado.*
- Sánchez, P., y Piquer, J. (2017). *Geología de Minas : Introducción y conceptos básicos.*
- Selley, R. C., y Sonnenberg, S. A. (2014). Elements of Petroleum Geology. En *Elements of Petroleum Geology* (3ª Edición). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-386031-6.09001-9>
- Serrano González, R. (1995). *Compañía Minera de Sierra Menera.* Zaragoza: Departamento de Educación, Cultura y Deporte (Gobierno de Aragón).
- Servicio Geológico Mexicano. (2017). Explotación minera. Recuperado de [https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones\\_geologicas/Explotacion-minera.html](https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Explotacion-minera.html)
- Servicios y Proyectos del Ebro S.A. (2011). *Elaboración de los mapas de susceptibilidad de movimientos de ladera, colapsos, vientos fuertes e inundaciones esporádicas en Aragón.*
- Soraire, F. (2014). Entre la Madre Tierra y la Madre de las Industrias. Gestión de recursos , cerros , mega- minería y conflicto socio-ambiental en Argentina. *Trabajo y Sociedad*, 23, 425-438.

Sotomayor, A. (2018). *Tecnologías limpias: Medio ambiente y comercialización de minerales* (1ª edición). Lima: Universidad de Lima.

Terry Macalister. (2011). Background: What caused the 1970s oil price shock? *The Guardian*.

Thomson, I., y Boutilier, R. (2011). La Licencia Social Para Operar. En P. Darling (Ed.), *SME Manual de Ingeniería Minera* (pp. 1779-1796). Littleton, Colorado (Estados Unidos): Sociedad de Minería, Metalurgia y Exploración.

UNESCO. (s. f.). Reservas de la Biosfera. Recuperado de Ecological Sciences for Sustainable Development website: <http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/ecological-sciences/biosphere-reserves/>

USGS. (s. f.). EarthExplorer. Recuperado de <https://earthexplorer.usgs.gov/>

USGS. (2019). Water-Quality Topics: Hydraulic Fracturing. Recuperado de <https://water.usgs.gov/owq/topics/hydraulic-fracturing/>

Velasco, P. R. (2001). *Acciones de política territorial: La localización de servicios y equipamientos públicos en espacios rurales en proceso de despoblación*.

Villena, J., y Pardo, G. (1983). X Congreso Internacional de Estratigrafía y Geología del Carbonífero. Carbonífero y Pérmico de España. En C. Martínez Díaz (Ed.), *El carbonífero de la Cordillera Ibérica*. Madrid: Ministerio de Industria y Energía. Secretaría de la Energía y Recursos Minerales. Instituto Geológico y Minero de España.

Wotruba, H., Hentschel, T., Hruschka, F., y Priester, M. (2000). Manejo Ambiental en la Pequeña Minería. Recuperado de GAMA-COSUDE website: <http://www.gama-peru.org/libromedmin/>