



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA
Departamento de Ingeniería Minera, Geológica y Cartográfica

Tesis doctoral presentada por:

CRISTÓBAL GARCÍA GARCÍA

**IMPACTO Y RIESGO AMBIENTAL DE LOS RESIDUOS
MINERO-METALÚRGICOS DE LA SIERRA DE
CARTAGENA-LA UNIÓN (MURCIA-ESPAÑA)**

Directores:

Dr. Roberto L. Rodríguez Pacheco
Dr. José I. Manteca Martínez

Noviembre de 2004

A mi mujer, Rosa María, porque siempre espera sin límites.

A nuestros hijos Cristóbal (y su mujer Marina), Cecilia, Borja, Almudena, Beatriz e Ignacio, por las muchas horas que les he robado para hacer este trabajo.

**¿Cómo podré pagar al Señor todo el
bien que me ha hecho?**

Sal. 116,12

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	I
RESUMEN.....	V
PRESENTACIÓN.....	IX
ÍNDICES.....	XI
Memoria.....	XII
Figuras.....	XX
Tablas.....	XXVII
Fotos.....	XXXI
Abreviaturas.....	XXXVI
CAPÍTULO 1.....	1 a 34
CAPÍTULO 2.....	35 a 98
CAPÍTULO 3.....	99 a 106
CAPÍTULO 4.....	107 a 140
CAPÍTULO 5.....	141 a 190
CAPÍTULO 6.....	191 a 232
CAPÍTULO 7.....	233 a 298
CAPÍTULO 8.....	299 a 330
CAPÍTULO 9.....	331 a 34
CAPÍTULO 10.....	347 a 358
REFERENCIAS.....	359 a 388
ANEXOS.....	389 a 424

AGRADECIMIENTOS

Escribir estas últimas líneas me hace recordar cuando comenzó a gestarse este trabajo, como se ha ido desarrollando y como llega a su fin. Como hombre de fe, católico practicante, he de reconocer que esta tesis no es fruto de la casualidad. Sin saber muy bien para qué y con qué finalidad, hace algunos años comencé a realizar un inventario de los pozos mineros y de los restos arqueo-industriales de la Sierra Minera. Después, al grupo de investigación donde estoy integrado en la Universidad Politécnica de Cartagena, nos solicitaron diversos trabajos, tanto entidades públicas como empresas privadas. Todos ellos en la Sierra Minera. En el año 2002 surgió un proyecto de I+D+I con otras universidades, y fue la ocasión de conocer al Dr. Roberto Rodríguez Pacheco; que después de mostrarle mi inquietud por hacer la tesis y darle a conocer los datos de que disponía, tuvo la osadía de prestarse a dirigirla.

Ahora es el momento de recordar y expresar mi agradecimiento a quienes, de forma directa o indirecta, me han ayudado a lo largo del desarrollo de este trabajo. Pido disculpas a aquellos que, por olvido o confianza, deje de citar.

Comienzo expresando mi agradecimiento a los alumnos, de la actual UPCT, que colaboraron conmigo en distintas épocas y con distinta intensidad, en el inventario de pozos mineros de la Sierra: Alfonso Carrión Martínez y José Vilar Sánchez (1995); David Sáez Paredes y Pedro de la Hoz de la Asunción (1996); Andrés Gambín Cánovas y Antonio García Saura (1997); Isidro Sánchez Rabadán (2000); Fulgencio-José Sánchez Roca, Asensio Soto Bernal y Juan Antonio Martín Camino (2001); Adela Ramos Escudero, Andrés García Molero y Marcos Moreira Jiménez (2003). Quiero destacar muy especialmente la gran y desinteresada ayuda de Marcos y Adela, porque fueron largas y duras jornadas de campo, inventariando pozos y residuos, cogiendo muestras de agua, realizando multitud de ensayos de granulometría, etc.

A mi amigo y antiguo compañero de estudios, José Luíís Bonilla, por su aportación de datos y explicaciones de cuanto le he consultado.

A Virginia-María Robles Arenas, doctoranda de la UPC, por su valiosa ayuda en el tratamiento de los datos de hidrología, correcciones y por darme ánimos constantemente.

Al Dr. Ignasi Queralt Mitjans, investigador del Instituto Jaume Almera de Barcelona, con el que colaboro en proyectos de I+D, por su interés en los temas relacionados con la minería de esta Sierra Minera, por darme ánimos, y también por los análisis realizados.

A la Dra Manuela Hidalgo del departamento de química de la UG, por el interés que siempre ha mostrado y los muchos análisis de muestras de agua y residuos que ha realizado.

A Alberto Alcolea, compañero de la UPCT, químico del SAIT (Servicio de Atención a la Investigación Tecnológica), que ha realizado los análisis de microscopía de barrido.

A mis compañeros del área de Geodinámica externa, Tomás, José Ángel y Carlos, por su ayuda moral y correcciones del texto.

A José Matías Peñas Castejón, por su apoyo en sistemas informáticos y aportación cartográfica.

A Ismael González Vargas, alumno de Ingeniería Técnica de Minas, por resolver los problemas informáticos que le he planteado y su valiosa ayuda en la edición de esta tesis.

A los compañeros del Área de Edafología y Química Agrícola, que me han facilitado la impresora laser con la que he realizado la impresión.

A Luís Belchí, maestro de maestros mineros, por su gran amabilidad y generosidad, en cuantas cuestiones le he consultado sobre temas de minería contemporánea.

A Ginés Guzmán, maestro minero, por sus explicaciones teóricas y prácticas, sobre el funcionamiento de los métodos gravimétricos utilizados en la Sierra.

A María Ruíz Serrano, jefa de sección de la hemeroteca de la UPCT, por su gran ayuda en la búsqueda de información bibliográfica.

A los colaboradores del Instituto Nacional de Meteorología, D^a Aurea Martínez, de la Estación de “El Algar”, y a Pepe Constanzo, de la de “Salinas de Cabo de Palos”, amigo de la infancia, por su colaboración en la recogida de muestras de agua.

A mi director de tesis Roberto Lorenzo Rodríguez Pacheco, le agradezco muchísimo el ánimo constante que me ha dado durante dos largos años, por las muchas horas que hemos trabajado juntos y por haber confiado en mí. A su mujer Anna, por la paciencia que ha mostrado ante las estancias de su marido en Cartagena.

A mi compañero de tantos años Nacho, y también director de esta tesis, por su gran ayuda en la revisión del texto, en su aportación de datos y conocimientos sobre la Sierra Minera en la que tantos años hemos trabajado juntos.

A mis padres y a mis hermanos.

A mis hermanos en la fe de la 2ª Comunidad de San Antonio Abad (San Antón-Cartagena) y la 1ª de Nª Sª de Los Dolores (La Unión), por lo mucho que se han preocupado y rezado por mí, para que este trabajo llegue a buen término.

Este trabajo se ha desarrollado dentro de los proyectos: PPQ2001-2100-C04 del Plan Nacional de I+D+I (2001-2003) y el PB/44/FS/2002 financiado por la Fundación Séneca de la Comunidad Autónoma de Murcia, gracias a los cuales se han podido realizar multitud de análisis contenidos en esta tesis.

RESUMEN

El objetivo de esta tesis es determinar el impacto y riesgo ambiental de los residuos minero-metalúrgicos (RMM) de la Sierra Minera (SM) de Cartagena-La Unión (Murcia-España). En el desarrollo de la investigación se han empleado diferentes técnicas y métodos entre los que se destacan la cartografía del terreno, ensayos por difracción de rayos X, lixiviados y determinación de la composición química de las diferentes muestras por ICP-MS.

Para delimitar el riesgo e impacto ambiental de los RMM se ha realizado una caracterización del medio físico del área de estudio y su radio de influencia que incluye el análisis de las características geológicas, estructurales, hidrogeológicas y las diferentes variables climáticas (temperatura, evaporación, precipitación, velocidad y dirección del viento). Conjuntamente se realizó un muestreo de los diferentes tipos de agua (lluvia, escorrentía superficial, subterráneas, Mar Menor y Mar Mediterráneo), suelos, sedimentos y los diferentes residuos mineros. Además, se ha analizado la información bibliográfica existente sobre el área de estudio y su radio de influencia con énfasis en la concentración de Pb, Cd y Zn en plantas, animales marinos y terrestres, agua, suelos y sedimentos, etc., con el fin de poder tener una visión integradora del problema ambiental del área estudiada.

En el trabajo se ha obtenido un gran número de resultados entre los que se destacan la cartografía, clasificación y delimitación de nueve tipos de residuos (*estériles de corta, de gravimetría, de mina, de pozo, de granulometría, óxidos, lodos de flotación en tierra y mar, y escoria de fundición*). Se realiza la delimitación y evaluación del impacto y riesgo ambiental de cada uno de ellos. De todos los residuos, los de mayor impacto y riesgo ambiental son los derivados de los procesos de flotación y gravimetría, aunque hay que señalar que el riesgo por erosión hídrica es común para todos.

Los resultados de la hidrología superficial y subterránea muestran que la contaminación del agua subterránea en la Sierra Minera las inhabilita para su uso como agua potable, y en muy pocos casos puede ser usada como agua de riego sin tener en cuenta ciertas precauciones o tratamientos específicos. Los altos valores de sales disueltas (Zn, Pb, Mn, Fe, SO_4^{2-}) en el acuífero, son el resultado de la oxidación de los sulfuros, siendo favorecida por la existencia de flujo preferencial, debido a la existencia de minas subterráneas, pozos mineros, fallas y grietas en los macizos rocosos. La presencia de Mg^{2+} en el agua se debe a la reacción entre el ácido sulfúrico, que se genera en la oxidación de la pirita y las dolomías $(\text{CO}_3)_2 \text{CaMg}$ y silicatos de Mg (olivino, piroxenos, anfíboles, talco, biotita, clorita). Los metales (Zn, Pb, Cd, Cu, Ni, Mn, Fe), presentes en las aguas subterráneas, se encuentran en forma libre (M^{2+}) o formando complejos (MSO_4^{2-}). Considerando los componentes mayoritarios de las aguas subterráneas estas se clasifican como sulfatadas magnésicas y mixtas.

De acuerdo a la caracterización integral del medio físico, objeto de nuestro estudio y el análisis de la información climática, geológica, hidrogeológica y de los tipos de residuos, se puede concluir que el impacto y riesgo ambiental de los RMM de la SM está controlado y condicionado por las formas en que se desarrolla el flujo y transporte de contaminantes en la zona. En la Sierra Minera se pueden diferenciar tres vías principales de flujo y transporte de sustancias contaminantes: I) la escorrentía superficial, II) el transporte y deposición por el viento y III) el flujo subterráneo del agua.

La escorrentía superficial tiene un carácter intermitente, sus efectos son considerables pues se produce en corto espacio de tiempo, debido al carácter torrencial de las precipitaciones. El aporte de sedimentos, sales y metales en suspensión que se produce por la escorrentía superficial, afecta fuertemente los ecosistemas del Mar Menor y el Mar Mediterráneo y las áreas de inundación de las ramblas, fundamentalmente en la desembocadura. Entre los principales contaminantes que transportan las aguas superficiales se encuentran los sulfatos, compuestos metálicos en disolución (Pb, Zn, Cd, Mn y Fe) y partículas sólidas en suspensión. El principal efecto se aprecia en las zonas de inundación de las ramblas y el Mar Menor, donde el sedimento del fondo marino presenta concentraciones elevadas de Pb, Cd, Zn, Mn y Fe. La zona costera del Mar Mediterráneo en el área está contaminada por el vertido directo de los lodos de flotación en la Bahía de Portman.

El transporte eólico se desarrolla durante todo el año y provoca el aporte de sales ricas en Pb, Cd, Zn, Cu, Ni, sulfatos y partículas sólidas a distancias considerables, provocando su deposición sobre el suelo y el medio marino en toda la zona de la Sierra Minera y su radio de influencia. Para verificar el efecto del transporte y deposición que desarrolla el viento se realizó un control del volumen de precipitación atmosférica y su composición química en dos estaciones meteorológicas. Los análisis reflejan la existencia de concentraciones elevadas de metales (Pb, Cd, Zn, Cu y Ni) y sulfatos. El aporte de partículas ricas en sulfatos y metales a la atmósfera proviene fundamentalmente de las balsas de lodos, derivados de los procesos minero-metalúrgicos de flotación, compuestos entre el 4 y 10 % de partículas finas, menores de 10 micras.

El flujo subterráneo tiene un efecto más local, pues la permeabilidad de los materiales es baja. Se ha comprobado que debido al impacto ambiental de las actividades mineras y a la infiltración de los lixiviados de las escombreras de residuos, existentes en la superficie del terreno del área estudiada sin ningún tipo de impermeabilización, en las aguas subterráneas ha provocado su contaminación con diferentes metales (Mg, Pb, Cd, Zn, Mn, Sr y Fe) y sulfatos. La infiltración de las aguas meteóricas en los residuos mineros de flotación está favorecida por la existencia de grietas de desecación y planos de estratificación, con intercalación de capas de diferentes granulometrías. El flujo

subterráneo del agua esta controlado por la tectónica, las características de los materiales geológicos, las galerías y pozos mineros.

En función de los resultados del trabajo ha sido posible diferenciar y delimitar dos zonas de impacto ambiental: Zona I, denominada de impacto ambiental directo y la Zona II, de impacto ambiental indirecto, así como las áreas de mayor riesgo ambiental.

El conjunto de los resultados obtenidos ponen de manifiesto el impacto ambiental, provocado por el cierre de las actividades mineras sin control medioambiental ni medidas correctoras o de restauración.

Para la rehabilitación de las áreas de mayor impacto ambiental provocado por las actividades minero-metalúrgicas y los residuos generados por éstas se proponen una serie de medidas correctoras en las áreas mineras. La rehabilitación es necesaria si se quiere disminuir o eliminar el aporte de contaminantes en toda la región de la Sierra Minera y su radio de influencia. Consideramos que la principal y más viable de las medidas correctoras sería la reforestación de las diferentes áreas afectadas por las actividades minero-metalúrgicas, principalmente en las balsas de lodos de flotación y las de gravimetría. En segundo lugar se puede considerar la construcción de trampas de sedimentos en los cauces de las ramblas y la construcción de colectores de la escorrentía superficial.

SUMMARY

ENVIRONMENTAL IMPACT AND RISK OF A MINE AND METALLURGICAL WASTE IN SIERRA MINERA, CARTAGENA-LA UNIÓN (MURCIA, SPAIN).

The aim of this thesis is to evaluate the environmental impact and risk a mine and metallurgical waste (MMW) in Sierra Minera (SM), Cartagena-La Unión (Murcia, Spain) due to accumulation a 180 millions tones a MMW in this area.

The physical, geological and economical characteristic a SM has been described. Samples of rain, surface, ground and see water, soil, sediment and MMW were collected. The concentration of metals (Cd, Pb, Zn, Cu) in plants, marine and land animals and different type of water, soils and sediments has been studied to determine a general view of the environmental problem in this area.

Several methods (e.g. cartography, geomorphology interpretation, diffraction and florescence a RX, geotechnical classification, geochemical tests, chemical analysis by ICP-MS, etc.) were used for characterization a MMW. Nine types a MMW were classified according to origin and physical characteristic. The associated environmental risk and impact have been evaluated according different standard methodology.

The surface and ground water is very polluted by sulphated and metals (Zn, Fe, Mn, Cu, Ni, Cd, Pb). The presence of dissolved salts (Zn, Pb, Mn, Fe, SO_4^{2-}) is the result of sulphurs oxidation, which is heightened by preferential flow across subterranean mines, mining wells and cracks in the rocks massif.

The environmental risk and impact of the MMW are conditioned by the different ways pollutants are transported. There are three main transport ways: I) surface run-off, II) erosion, transport and deposition by the wind, and III) groundwater flow.

Salt in solutions, sediments, and metals in suspension were transport by surface run-off and place in the bed of ephemeral streams, wadis, flood plain, Mar Menor and the Mediterranean Sea. The main surface water pollutants are sulphate, dissolved metallic elements (Pb, Zn, Cd, Mn and Fe) and solid particles present in suspension form. The main atmosphere pollutants are sulphates and solid particles riche in metals were erosion and transported large distances by wind and deposited on earth surface and see.

Groundwater has been polluted with metals and sulphates by the infiltration of leached from the residue dumps. This problem is compounded by the existence of cracks caused by desiccation and bedding planes with layering of different gradations. Tectonic structure and gallery due to mine activities control the groundwater flow. According to the environmental impact a MMW two zone are defined: I) Castle San Julián, El Llano-La Unión and Cove Reona, affected directly by mine and metallurgical activities and II) Mar Menor and littoral between Cape Negrete and Cape Palos, affected indirectly by the accumulated a MMW in the study area.

Considering the environmental risk is possible in study area defined different zones: I) Castle San Julián, II) La Parreta, III) El Llano-La Unión-Portman, IV) Huerto Las Calesas, V) Las Cobaticas and VI) Cove Reona.

PRESENTACIÓN

La presente memoria se ha organizado en 10 Capítulos. El **Capítulo 1** sirve de introducción. En él se definen los conceptos básicos relativos al impacto ambiental. Se analiza el estado de conocimientos sobre los residuos mineros, en base a los trabajos publicados a nivel internacional y los antecedentes en el estudio sobre la Sierra Minera y su área de influencia. Se analiza la información de la legislación actual en materia de medio ambiente. Se definen los objetivos que se persiguen con esta tesis y los trabajos a realizar y se describe la metodología de trabajo seguida durante la realización de la misma.

En el **Capítulo 2** se muestran una síntesis del área de estudio, considerando las diferentes variables ambientales que pueden tener el papel más relevante en el desarrollo del impacto y riesgo ambiental de los residuos mineros. En éste se detallan las características físicas, climáticas, geológicas y el valor y riqueza medioambiental de la zona estudiada. Se describen los tipos de yacimientos minerales y las actividades mineras y los procesos mineralúrgicos que han tenido lugar en el área, pues las diferentes infraestructuras y los residuos generados por estas son los que han dado lugar al impacto ambiental existente sobre el medio terrestre y marino.

En el **Capítulo 3** se detallan las técnicas, métodos y equipos utilizados en el desarrollo de la investigación en función de los objetivos propuestos.

En el **Capítulo 4** se presentan los inventarios de las diferentes estructuras minero-metalúrgicas. Entre los principales se destacan el de los pozos mineros de toda la Sierra de Cartagena-La Unión y el de los residuos minero-metalúrgicos en el que se clasifican según su origen, tipo de material y modo de almacenamiento. Se citan las áreas de distribución de las minas subterráneas. Se describen las cortas mineras explotadas y su estado actual; también de las canteras de áridos para la construcción que se encuentran en actividad. Por último se analizan los bienes de interés cultural.

En el **Capítulo 5** se presenta la caracterización física, mineralógica y química de cada uno de los residuos mineros inventariados y cartografiados en la Sierra Minera. Conjuntamente con esta caracterización se detallan las principales características de distribución espacial por cuencas hidrográficas.

En el **Capítulo 6** se analizan las características físico-químicas de las aguas continentales superficiales y subterráneas, así como el grado de contaminación de éstas, su posible uso y principales contaminantes. Además, se realiza un análisis de la evolución de la contaminación en función de algunos parámetros químicos.

En el Capítulo 7 se caracteriza el impacto ambiental producido sobre la atmósfera, el medio marino (Mar Menor y Mar Mediterráneo) y sobre el medio terrestre que afecta a las masas de aguas continentales, tanto superficiales como subterráneas; al suelo; vegetación y fauna, así como el impacto sobre el paisaje. En este capítulo quedan definidas las zonas de mayor impacto ambiental de la Sierra Minera.

El Capítulo 8 se analiza el riesgo ambiental asociado a los residuos mineros. También se analizan los riesgos derivados de las diferentes estructuras mineras existentes en el área. De acuerdo a los resultados y los diferentes tipos de riesgo presentes en el área quedan definidas las áreas de mayor riesgo ambiental.

En el Capítulo 9 se proponen y fundamentan una serie de medidas correctoras para la restauración de las áreas afectadas por el impacto ambiental y que actualmente se encuentran muy degradadas.

En el **Capítulo 10** se resumen los resultados obtenidos y las conclusiones alcanzadas. Se establecen las líneas de investigación futuras que permitan dar una respuesta a las necesidades de la sociedad, para contribuir a la ordenación territorial, tanto de la Sierra Minera como de las áreas adyacentes que hayan sido afectadas por las actividades minero-metalúrgicas.

ÍNDICES

ÍNDICE DE LA MEMORIA

DESCRIPCIÓN	No página
<u>CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN</u>	1
1.1. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS EN GENERAL	3
1.1.1. IMPACTO SOBRE EL MEDIO AMBIENTE DE LAS ACTIVIDADES MINERO-METALÚRGICAS.....	3
1.1.2. IMPACTO SOBRE LAS MASAS DE AGUAS CONTINENTALES Y MARINAS.....	4
1.1.3. DRENAJES Y LIXIVIADOS DE AGUAS ÁCIDAS DE ESCOMBRERAS Y MINAS ACTIVAS E INACTIVAS.....	6
1.1.4. VARIACIÓN DE LA MORFOLOGÍA DEL TERRENO.....	9
1.1.5. IMPACTOS SOBRE LA ATMÓSFERA Y EL SUELO.....	10
1.1.6. IMPACTO SOBRE EL PAISAJE.....	11
1.1.7. CONTAMINACIÓN AMBIENTAL POR DIFERENTES FORMAS DE ENERGÍA.....	12
1.1.8. RIESGO AMBIENTAL POR ROTURA O FALLO MECÁNICO DE LAS PRESAS DE RESIDUOS.....	13
1.1.9. IMPACTO AMBIENTAL Y RIESGO DE LOS PROCESOS DE EROSIÓN.....	17
1.2. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO	17
1.3. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS	21
1.3.1. MOTIVACIÓN.....	21
1.3.2. OBJETIVOS.....	23
1.3.2.1. Objetivo general.....	23
1.3.2.2. Objetivos particulares.....	23
1.4. TRABAJOS REALIZADOS	24
1.5. METODOLOGÍA DEL TRABAJO	25
1.6. NORMATIVAS	26
1.6.1. DIRECTIVAS.....	26
1.6.2. LEGISLACIÓN PARA DETERMINAR LA CONTAMINACIÓN DE METALES.....	30
1.6.2.1. Límites de metales en suelos y sedimentos.....	30
1.6.2.2. Límites de metales en el agua.....	32
1.6.2.3. Límite de metales en dieta alimenticia humana.....	34
 <u>CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO:</u> <u>SIERRA DE CARTAGENA-LA UNIÓN (MURCIA-ESPAÑA</u>	 35
2.1. SITUACIÓN GEOGRÁFICA	36
2.2. RELIEVE	37

3.3. HIDROGRAFÍA	38
2.4. CLIMATOLOGÍA	39
2.4.1. PRECIPITACIONES.....	39
2.4.1.1. Lluvia	40
2.4.2. TEMPERATURA.....	42
2.4.3. EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	44
2.4.4. VIENTOS.....	46
2.5. VEGETACIÓN	47
2.5.1. MARCO BIOGEOGRÁFICO.....	47
2.5.2. VEGETACIÓN POTENCIAL.....	48
2.5.2.1. Asociaciones vegetales	49
2.5.3. VEGETACIÓN ACTUAL.....	50
2.6. EDAFOLOGÍA	51
2.7. GEOMORFOLOGÍA	52
2.8. MARCO GEOLÓGICO	54
2.8.1. CONTEXTO GEOLÓGICO DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	54
2.8.1.1. Complejo Nevado Filábride (CNF)	55
2.8.1.1.1. Nevado Filábride inferior (NFI).....	56
2.8.1.1.2. Nevado Filábride superior (NFS).....	57
2.8.1.2. Complejo Alpujárride (CA)	58
2.8.1.2.1. Unidad Alpujárride inferior (UAI) o Unidad de San Ginés.....	58
2.8.1.2.2. Unidad Alpujárride superior (UAS) o Unidad de Portman.....	59
2.8.1.2.3. Unidad de El Gorguel.....	60
2.8.1.3. Serie Neógena	61
2.8.1.4. Cuaternario	62
2.8.2. MAGMATISMO.....	63
2.8.3. TECTÓNICA.....	64
2.8.4. NEOTECTÓNICA Y SISMICIDAD.....	66
2.8.4.1. Sismotectónica de la Región de Murcia	67
2.8.4.2. Sismotectónica de la zona de estudio	68
2.8.4.3. Sismotectónica reciente y actual	70
2.9. YACIMIENTOS MINERALES	71
2.9.1. TIPOLOGÍA DE LOS YACIMIENTOS METÁLICOS.....	71
2.9.1.1. Los mantos	72
2.9.1.2. Diseminaciones en el Mioceno	76
2.9.1.3. Stockworks y filones asociados a vulcanitas	77
2.9.1.4. Cuerpos filonianos y reticulaciones en el paleozoico	78
2.9.2. ROCAS INDUSTRIALES.....	79
2.10. ACTIVIDAD MINERA	79
2.10.1. MÉTODOS DE EXPLOTACIÓN.....	79
2.11. PROCESOS MINERALÚRGICOS	81
2.11.1. MÉTODOS DE CONCENTRACIÓN.....	82

2.11.1.1. Concentración por Gravimetría.....	82
2.11.1.2. Concentración por Flotación diferencial.....	83
2.12. METALURGIA.....	87
2.13. PATRIMONIO GEOLÓGICO, MINERO Y ARQUEOLÓGICO...	88
2.13.1. PATRIMONIO GEOLÓGICO.....	88
2.13.2. PATRIMONIO MINERO.....	90
2.13.3. PATRIMONIO ARQUEOLÓGICO.....	92
2.14. ÁREAS PROTEGIDAS DE INTERÉS AMBIENTAL.....	93
2.14.1. ESPACIOS NATURALES PROTEGIDOS.....	93
2.14.2. RED NATURA 2000.....	95
<u>CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....</u>	99
3.1. GENERALIDADES.....	100
3.2. TRABAJO DE CAMPO.....	100
3.2.1. INVENTARIOS.....	100
3.2.2. TOMA DE MUESTRAS.....	101
3.3. TRABAJO DE	
LABORATORIO.....	102
3.3.1. CARACTERÍSTICAS DE LA FASE LÍQUIDA.....	102
3.3.2. CARACTERÍSTICAS DE LA FASE SÓLIDA.....	103
3.3.2.1. Propiedades físicas.....	103
3.3.2.2. Análisis granulométrico.....	103
3.3.2.3. Composición mineralógica.....	104
3.3.2.4. Composición química de la fase sólida.....	104
3.3.2.5. Ensayos geotécnicos.....	105
3.3.2.6. Parámetros hidráulicos.....	105
3.3.2.7. Propiedades mecánicas.....	105
3.3.2.8. Caracterización geoquímica.....	105
3.4. TRABAJO DE GABINETE.....	106
<u>CAPITULO 4. INVENTARIO DE ESTRUCTURAS MINERAS.....</u>	107
4.1. POZOS MINEROS.....	108
4.1.1. METODOLOGÍA EMPLEADA.....	108
4.1.2. DATOS QUE COMPONENTEN LA FICHA DE CAMPO.....	109
4.1.3. PROCEDIMIENTO DE TRABAJO.....	110
4.1.4. POZOS INVENTARIADOS.....	110
4.1.5. APLICACIONES DE LOS DATOS OBTENIDOS.....	112
4.1.5.1. Seguridad minera.....	112
4.1.5.2. Estudios hidrogeológicos.....	112
4.1.5.3. Geología.....	112
4.1.5.4. Datos estadísticos.....	112

4.1.5.4.1. Mapa de densidad de pozos por km ²	112
4.1.5.4.2. Tipos de protección.....	113
4.1.5.4.3. Altura de protección.....	115
4.1.5.4.4. Revestimiento de los pozos mineros.....	116
4.1.5.4.5. Profundidad de los pozos mineros.....	117
4.1.5.4.6. Tipos de secciones de los pozos.....	117
4.1.5.4.7. Dimensiones de las secciones de los pozos.....	118
4.1.5.4.8. Cimentación.....	119
4.1.5.4.9. Peligro.....	119
4.1.5.4.10. Accesibilidad.....	120
4.1.5.4.11. Proximidad a núcleos de población.....	120
4.1.5.4.12. Visitabilidad.....	120
4.1.5.4.13. Existencia de restos arqueo-industriales.....	121
4.1.5.4.14. Existencia de agua.....	122
4.1.5.4.15. Uso del agua.....	123
4.2. CORTAS MINERAS.....	123
4.3. RESIDUOS MINERO-METALÚRGICOS.....	125
4.3.1. INTRODUCCIÓN.....	125
4.3.2. METODOLOGÍA EMPLEADA.....	125
4.3.3. CUANTIFICACIÓN DEL ÁREA Y VOLUMEN DE LOS DEPÓSITOS DE RESIDUOS MINEROS.....	128
4.4. MINAS SUBTERRÁNEAS.....	129
4.5. CANTERAS.....	131
4.6. RESERVAS DE MINERAL.....	131
4.7. BIENES DE INTERÉS CULTURAL.....	136
4.7.1. ELEMENTO PATRIMONIAL MINERO.....	136
4.7.2. ELEMENTO PATRIMONIAL GEOLÓGICO.....	136
4.7.3. ELEMENTO PATRIMONIAL ARQUEOLÓGICO.....	136
4.8. DISCUSIÓN.....	137
<u>CAPITULO 5. CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS MINERO- METALÚRGICOS DE LA SIERRA DE CARTAGENA-LA UNIÓN.....</u>	141
5.1. ESTÉRIL DE CORTA.....	142
5.1.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS ESTÉRILES DE CORTA.....	142
5.1.2. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA.....	144
5.1.3. COMPOSICIÓN QUÍMICA.....	144
5.2. LODOS DE FLOTACIÓN.....	145
5.2.1. DESCRIPCIÓN DE LOS DEPÓSITOS DE LODOS.....	146
5.2.2. LODOS DE FLOTACIÓN DEPOSITADOS EN TIERRA.....	149
5.2.2.1. Características físicas de los lodos de flotación en tierra.....	149
5.2.2.2. Propiedades geotécnicas.....	151
5.2.2.3. Composición mineralógica.....	153

5.2.2.4. Composición química.....	153
5.2.2.5. Estructuras sedimentarias identificadas en las balsas de lodos.....	154
5.3. LODOS DE FLOTACIÓN DEPOSITADOS EN EL MAR.....	162
5.3.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS LODOS VERTIDOS AL MAR.....	163
5.3.2. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA DE LOS LODOS VERTIDOS AL MAR.....	164
5.3.3. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS LODOS VERTIDOS AL MAR.....	165
5.4. ESTÉRIL DE CONCENTRACIÓN GRAVIMÉTRICA.....	166
5.4.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS ESTÉRILES DE GRAVIMETRÍA....	166
5.4.2. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA.....	168
5.4.3. COMPOSICIÓN QUÍMICA.....	169
5.5. ESTÉRIL DE MINA.....	170
5.5.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS ESTÉRILES DE MINA.....	170
5.5.2. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA.....	171
5.5.3. COMPOSICIÓN QUÍMICA.....	172
5.6. ÓXIDOS.....	172
5.6.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS ÓXIDOS.....	173
5.6.2. COMPOSICIÓN PETROLÓGICA.....	174
5.6.3. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA.....	176
5.6.4. COMPOSICIÓN QUÍMICA.....	177
5.7. RECHAZO DE GRANULOMETRÍA.....	178
5.7.1. CARACTERÍSTICAS DEL RECHAZO DE GRANULOMETRÍA.....	179
5.7.2. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA.....	180
5.7.3. COMPOSICIÓN QUÍMICA.....	180
5.8. ESCORIAS DE FUNDICIÓN.....	181
5.8.1. CARACTERÍSTICAS DE LAS ESCORIAS DE FUNDICIÓN.....	181
5.8.2. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA.....	183
5.8.3. COMPOSICIÓN QUÍMICA.....	183
5.9. ESTÉRIL DE POZO.....	184
5.9.1. CARACTERÍSTICAS DEL ESTÉRIL DE POZO.....	184
5.9.2. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA.....	185
5.9.3. COMPOSICIÓN QUÍMICA.....	186
5.10. DISCUSIÓN.....	186
<u>CAPITULO 6. HIDROLOGÍA SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA.</u>	
<u>CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS.....</u>	191
6. 1. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DEL AGUA DE LLUVIA.....	192
6.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE LAS AGUAS SUPERFICIALES.....	196
6. 3. CARÁCTERÍSTICAS DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	199
6.3.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICO QUÍMICAS DE LAS AGUAS DE	199

CORTAS MINERAS.....	
6.3.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICO QUÍMICAS DE LAS AGUAS DE SURGENCIAS DE MINAS.....	201
6.3.3. CARACTERÍSTICAS DE LA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA SIERRA MINERA.....	204
6.3.3.1. Piezometría y parámetros hidráulicos.....	204
6.3.3.2. Características físico químicas de las aguas subterráneas.....	208
6.3.3.3. Comportamiento de los metales.....	214
6.3.3.4. Calidad de las aguas subterráneas.....	225
6.4. EVOLUCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	227
6.5. DISCUSIÓN.....	228
<u>CAPITULO 7. IMPACTO AMBIENTAL DE LAS ACTIVIDADES MINERAS DE LA SIERRA DE CARTAGENA-LA UNIÓN</u>	233
7.1. IMPACTOS SOBRE EL MEDIO CONTINENTAL	234
7.1.1. IMPACTO SOBRE EL SUELO.....	234
7.1.1.1. Muestras superficiales (capa arable).....	236
7.1.1.2. Perfiles del suelo (sondeos con recuperación de testigo).....	240
7.1.1.3. Sedimentos depositados en el cauce de las ramblas.....	245
7.1.2. IMPACTO SOBRE LA VEGETACIÓN.....	247
7.1.3. IMPACTO SOBRE LA FAUNA TERRESTRE.....	249
7.1.4. IMPACTO SOBRE LAS MASAS DE AGUA CONTINENTALES....	249
7.1.4.1. Impacto sobre las aguas superficiales.....	249
7.1.4.2. Impacto sobre las aguas subterráneas.....	252
7.2. IMPACTOS SOBRE EL MEDIO MARINO	252
7.2.1. IMPACTO SOBRE LA LAGUNA DEL MAR MENOR.....	252
7.2.1.1. Disposición de sedimentos y distribución de metales en el fondo marino.....	256
7.2.1.2. Impacto sobre el agua del lagoon. Calidad de las aguas.....	264
7.2.1.3. Impacto sobre la flora y fauna marina.....	265
7.2.2. IMPACTO SOBRE EL MAR MEDITERRÁNEO.....	273
7.2.2.1. Acumulación de sedimentos en la Bahía de Portman.....	274
7.2.2.2. Concentración de metales en los sedimentos de la Bahía de Portman.....	275
7.2.2.3. Impacto sobre el agua del Mar Mediterráneo. Calidad del agua en la Bahía de Portman.....	278
7.2.2.4. Impacto sobre la flora y fauna en la Bahía de Portman.....	280
7.3. IMPACTO SOBRE EL PAISAJE	285
7.4. IMPACTO AMBIENTAL A LA ATMÓSFERA	286
7.5. DISCUSIÓN	290

<u>CAPITULO 8. RIESGO AMBIENTAL</u>	299
8.1. RIESGO POR EROSIÓN EÓLICA	300
8.2. RIESGO POR EROSIÓN HÍDRICA	301
8.2.1. CUANTIFICACIÓN DE LA TASAS DE EROSIÓN.....	303
8.3. RIESGO SÍSMICO	305
8.3.1. EN ZONAS DE MINERÍA SUBTERRÁNEA.....	305
8.3.2. EN RELACIÓN CON LA LICUEFACIÓ DE BALSAS DE LODOS	312
8.4. RIESGO POR HUNDIMIENTO EN ZONAS MINERAS, DEBIDO A CAUSAS NO SISMOTECTÓNICAS	312
8.5. RIESGO COLAPSO DEBIDO A EROSIÓN SUBTERRÁNEA	313
8.6. RIESGO POR PÉRDIDA DE ESTABILIDAD DE LAS BALSAS	315
8.7. RIESGO AMBIENTAL POR LIXIVIADO (PARA EL MEDIO HÍDRICO)	316
8.8. ANÁLISIS DE METALES EN DOS SONDEOS REALIZADOS EN BALSAS DE LODOS DE FLOTACIÓ	320
8.9. DISCUSIÓ	327
<u>CAPITULO 9. MEDIDAS CORRECTORAS</u>	331
9.1. REFORESTACIÓ Y RECUPERACIÓ DE LAS AREAS AFECTADAS POR LA ACTIVIDAD MINERA	332
9.1.1. FACTORES LIMITANTES AL CRECIMIENTO DE LA VEGETACIÓ.....	333
9.1.1.1. Factores endógenos	333
9.1.1.1.1. Factores químicos.....	333
9.1.1.1.2. Factores físicos.....	335
9.1.1.2. Factores exógenos	336
9.1.2. REFORESTACIÓ.....	337
9.1.2.1. Sustrato mineral	338
9.1.2.2. Enmienda orgánica	338
9.2. SELLADO DE POZOS MINEROS	339
9.3. TRAMPAS DE SEDIMENTOS	339
9.4. MEDIDAS CORRECTORAS SOBRE EL PAISAJE	340
9.5. RELLENO DE HUECOS MINEROS Y CORTAS	340
9.6. ELIMINACIÓ DE LAS BALSAS	341
9.7. LIMPIEZA DE LAS BAHÍAS DE PORTMAN Y EL GORGUEL	342
9.8. LIMPIEZA DE LAS RAMBLAS	342
9.9. MEDIDAS CORRECTORAS SOBRE LA FAUNA	343
9.10. MEDIDAS CORRECTORAS SOBRE EL PATRIMONIO CULTURAL	343
9.11. DISCUSIÓ	343

<u>CAPÍTULO 10. CONCLUSIONES</u>	347
10.1. INFORMACIÓN Y ESTUDIOS EXISTENTES	348
10.2. METODOLOGÍA	349
10.3. CARTOGRAFÍA	349
10.4. RESIDUOS MINEROS	349
10.5. HIDROLOGÍA SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA	350
10.6. IMPACTO AMBIENTAL	351
10.7. RIESGO AMBIENTAL DE LOS RESIDUOS	352
10.8. CONCLUSIÓN GENERAL	354
10.9. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	355
10.8.1. DE APLICACIÓN INMEDIATA.....	355
10.8.2. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN A DESARROLLAR....	356

ÍNDICE DE FIGURAS

DESCRIPCIÓN	No página
Figura 1.1. Variación del nivel freático que provoca la construcción de una escombrera sobre un acuífero libre (Rodríguez, 2002).....	7
Figura 1.2. Pendientes para las que ocurre la mayor erosión por el agua y el viento en los taludes de las presas de residuos y estériles (Adaptado de Bligh, 1994).....	14
Figura 1.3.A) Rangos de granulometría en los que pueden desarrollarse los procesos de licuefacción. B) Rangos para residuos mineros que por el tamaño de sus partículas se clasifican como limos (Committee on Earthquake Engineering, 1985).....	15
Figura 1.4. Foto satélite del área comprendida por la Sierra de Cartagena-La Unión.....	22
Figura 1.5. Diagrama de flujo de la metodología de trabajo.....	26
Figura 2.1. Situación geográfica de la Sierra de Cartagena-La Unión.....	37
Figura 2.2. Mapa de Pendientes (IGME, 1999b).....	38
Figura 2.3. Esquema de las cuencas hidrográficas de la Sierra de Cartagena-La Unión.....	39
Figura 2.4. Localización de las estaciones meteorológicas. E-1: Cartagena Puerto; E-2: Corvera; E-3: El Algar; E-4: Fuente Álamo; E-5: Los Martínez del Puerto; E-6: Murcia San Javier; E-7: Murcia San Majín; E-8: Pozo Estrecho; E-9: Salinas de Cabo de Palos; E-10: San Pedro del Pinatar; E-11: Sucina; E-12: Torre Pacheco CCA; E-13: Torre Pacheco Torre Blanca.....	40
Figura 2.5. Precipitación media anual (periodo 1975 a 1998) Datos del INM y elaboración propia.....	41
Figura 2.6. Mapa de isoyetas (periodo 1975 a 1998). Datos del INM y elaboración propia.....	46
Figura 2.7. Precipitación media mensual (periodo 1975 a 1998) Datos del INM y elaboración propia.....	42
Figura 2.8. Temperatura media anual (periodo 1975 a 1998) Datos del INM y elaboración propia.....	43
Figura 2.9. Temperatura media mensual (periodo 1975 a 1998) Datos del INM y elaboración propia.....	43
Figura 2.10. Mapa de Isotermas (periodo 1975 a 1998). Datos IGN y elaboración propia.....	44
Figura 2.11. ETP y ETR (periodo 1975 a 1998).....	45
Figura 2.12. Mapa de Iso-ETR (periodo 1975 a 1998). Datos IGN y elaboración propia.....	45
Figura 2.13. Rosa de vientos de las estaciones del año. Estación: aeródromo de San Javier. Periodo 1961 a 1990. Datos del INM (1998).....	47
Figura 2.14. Mapa biogeográfico de la C.A.R.M. (Alcaraz, 1999).....	48
Figura 2.15. Mapa de Vegetación actual. C.A.R.M. D.G.M.N.....	51
Figura 2.16. Mapa de Síntesis Edafológica. 2: Paleargid, Petrocálcico; 3: Paleorthid, Típico y Xerollico; 5: Calcirthid, Típico, Lítico y Xerollico; 7: Calciorthid, Típico, Lítico y Xerollico; 10: Calciorthid, Típico, Lítico y Xerollico; 16: Torriorthent, Típico y Lítico; 18: Torriorthent, Típico y Lítico. (ITGE, 1999b).....	52
Figura 2.17. Mapa Geomorfológico (ITGE 1999b).....	53
Figura 2.18. Esquema geológico-estructural de la Sierra de Cartagena-La Unión (Modificado de Manteca et al., 2004).....	54
Figura 2.19. Columna lito-estructural simplificada de la zona central de la Sierra de Cartagena-La Unión (Manteca y Ovejero, 1992). V: dacitas y andesitas. N: areniscas y conglomerados. 2AS: dolomías y calizas. 1AS: cuarcitas y filitas. 3AI: calizas y dolomías. 2AI: doleritas subvolcánicas. 1AI: filitas y cuarcitas. 4NF: mármoles. 3NF: metabasitas. 2NF: esquistos y cuarcitas. 1NF: esquistos grafitosos y cuarcitas.....	55
Figura 2.20. Mapa Neotectónico de la Región de Murcia. (ITGE, 1994d).....	67

Figura 2.21. Mapa sismotectónico de la Región de Murcia. (Modificado de Ibargüen y Rodríguez Estrella, 1996).....	68
Figura 2.22. Mapa de isosistas del sismo 1-11-196. Datos del IGN y elaboración propia.....	69
Figura 2.23. Esquema geológico de la Sierra de Cartagena-La Unión, con indicación de las iniciales de las cortas y cortes geológicos del 1 al 4 (Manteca y Ovejero, 1992).....	71
Figura 2.24. Distribución de los depósitos mineralizados en la Sierra de Cartagena-La Unión (Manteca y Ovejero, 1992).....	72
Figura 2.25. Bloque diagrama de los yacimientos de las cortas San Valentín y Tomasa.....	73
Figura 2.26. Cortes geológicos de algunos yacimientos representativos de distintos cuerpos mineralizados (Manteca y Ovejero, 1992).	74
Figura 2.27. Cortes geológicos generales a través de los principales yacimientos. Los cortes se indican en la figura 2.24. (Manteca y Ovejero, 1992).....	75
Figura 2.28. Esquema de explotación (SMMP-E, 1970).....	81
Figura 2.29. Esquema de tratamiento del lavadero Roberto, ubicado en la población Portman (S.M.M. Peñarroya, España, S.A., 1985).....	85
Figura 2.30. Mapa de Patrimonio Geológico (Arana et al. 1999).....	89
Figura 2.31. Red de Espacios Naturales Protegidos (CAAMA, 2002).....	94
Figura 2.32. Lugares de Interés Comunitario (CAAMA, 2002).....	95
Figura 2.33. Zonas de Especial Protección para las Aves (CAAMA, 2002).....	96
Figura 2.34. Zonas Especialmente Protegidas de Importancia para el Mediterráneo (CAAMA, 2002).....	97
Figura 4.1. Diagrama de flujo de la metodología para inventario de pozos mineros.....	109
Figura 4.2. Mapa de distribución de pozos mineros de la Sierra de Cartagena-La Unión.....	111
Figura 4.3. Localización de los pozos mineros inventariados en la Sierra de Cartagena-La Unión. Mapa reducido del original a escala 1:25.000.....	113
Figura 4.4. Mapa de isoconcentración de pozos de la Sierra de Cartagena-La Unión.....	113
Figura 4.5. Tipos de protección de los pozos mineros.....	114
Figura 4.6. Altura de protección de los pozos mineros.....	116
Figura 4.7. Revestimiento de los pozos mineros.....	116
Figura 4.8. Profundidad de los pozos mineros (expresada en m).....	117
Figura 4.9. Tipos de secciones de la protección de los pozos.....	118
Figura 4.10. Dimensiones de las secciones de los pozos (diámetro en m).....	118
Figura 4.11. Cimentación de los pozos.....	119
Figura 4.12. Peligro (en función de la altura de protección).....	119
Figura 4.13. Accesibilidad de los pozos mineros.....	120
Figura 4.14. Proximidad de los pozos a núcleos de población.....	120
Figura 4.15. Visitabilidad del entorno de los pozos.....	121
Figura 4.16. Existencia de restos arqueológicos industriales en la proximidad de los pozos mineros.....	121
Figura 4.17. Existencia de agua en los pozos mineros.....	123
Figura 4.18. Uso del agua de los pozos mineros.....	123
Figura 4.19. Mapa de los residuos minero-metalúrgicos de la Sierra de Cartagena-La Unión. Mapa reducido del original a escala 1:25.000.....	127
Figura 4.20. Mapa de zonas de minados de la Sierra de Cartagena-La Unión. Mapa reducido del original a escala 1:25.000.....	130
Figura 4.21. Representación gráfica de los yacimientos de mineral Pb-Zn, investigados y valorados, en la Sierra de Cartagena-La Unión.....	134
Figura 4.22. Mapa de reservas de mineral. Cortas inactivas y canteras de áridos activas. Mapa reducido del original a escala 1:25.000.....	135

Figura 4.23. Distribución de las Estructuras Mineras (EM) y Bienes de Interés Cultural (BIC) en la Sierra de Cartagena-La Unión.....	138
Figura 4.24. Mapa de distribución espacial de los Bienes de Interés Cultural y Natural de la Sierra de Cartagena-La Unión. Mapa reducido del original a escala 1:25.000.....	139
Figura 5.1. Curvas granulométricas de los estériles de corta.....	144
Figura 5.2. Tipos de implantación de balsas mineras en tierra (IGME, 1986c).....	146
Figura 5.3. Esquema de construcción de una balsa de lodos A) en planta y B) en sección (IGME, 1984).....	148
Figura 5.4. Valores de pH de diferentes balsas de lodos de flotación.....	150
Figura 5.5. Curvas granulométricas de lodos de flotación en tierra, a) en húmedo y b) en seco....	151
Figura 5.6. Curvas granulométricas de lodos de flotación vertidos al Mar (LFM) en las bahías de Portman y del Gorguel en el Mar Mediterráneo.....	164
Figura 5.7. Representación de los valores de pH medidos en varias muestras de terreras de gravimetría.....	167
Figura 5.8. Curvas granulométricas de terreras de gravimetría. a) en húmedo. b) en seco.....	168
Figura 5.9. Curvas granulométricas de los estériles de mina de la muestra P-E8.....	171
Figura 5.10. Curvas granulométricas de 2 muestras de óxidos.....	174
Figura 5.11. Diagrama triangular. Procedencia de corta San Valentín: Primera (1); Anticipada (2) y Cuarta (3). Procedencia de corta Emilia: Esmeralda (4); Erizo (5) y Casualidad (6). Procedencia de corta Tomasa: Miseria (7).	176
Figura 5.12. Curvas granulométricas de dos muestras de rechazo de granulometría: P-RG1 y P-RG1 (fino).....	179
Figura 5.13. Curvas granulométricas de dos muestras de escoria de fundición o gacheros.....	182
Figura 5.14. Curvas granulométricas de dos muestras de estéril del pozo (C-1086).....	185
Figura 5.15. Volumen almacenado y extensión que ocupan los residuos mineros de la Sierra de Cartagena-La Unión.....	187
Figura 5.16. Relación entre el volumen y la extensión de los residuos mineros de la Sierra de Cartagena-La Unión.....	187
Figura 5.17. Curvas granulométricas resumen donde se muestran los 9 tipos de residuos minero-metalúrgicos estudiados.....	189
Figura 5.18. Variación de los valores de pH de cada tipo de residuo minero-metalúrgico.....	189
Figura 6.1. Mapa de distribución de los puntos de toma de muestras de agua analizados en la Sierra Minera y su radio de influencia. Mapa reducido del original a escala 1:25.000.....	193
Figura 6.2. Variación de la concentración de sulfatos, Ni, Pb, Cd, Zn y Cu en relación con la precipitación por unidad de área (L/m ²) en la estación “Cabo de Palos”.....	195
Figura 6.3. Diagrama triangular representando las facies aniónicas y catiónicas predominantes en tanto por ciento en peso en el agua de lluvia y en las superficiales.....	198
Figura 6.4. Diagrama triangular representando las facies aniónicas y catiónicas predominantes en tanto por ciento en peso en el agua de las cortas mineras.....	201
Figura 6.5. Diagrama triangular representando las facies aniónicas y catiónicas predominantes en tanto por ciento en peso en el agua de drenaje de galerías mineras.....	202
Figura 6.6. Mapa de distribución de todos los puntos de agua inventariados. Mapa reducido del original a escala 1:25.000.....	205
Figura 6.7. Mapa preliminar de isopiezas elaborado con los datos de niveles medidos en 388 pozos (Enero-Marzo de 2003). Los límites considerados para la zona de estudio son al W una línea arbitraria (L.A.), al S la línea de costa del mar Mediterráneo y al N el trazado de la carretera MU-312.....	207
Figura 6.8. Perfil geológico general SW-NE del entorno de corta Brunita para apreciar la disposición de los diferentes materiales geológicos y de las galerías mineras. (IGME, 1996).....	207

Figura 6.9. Variación del rango de CE de las 108 muestras de agua subterránea. La línea discontinua muestra el valor límite establecido para agua potable.....	209
Figura 6.10. Variación del rango de pH de las 108 muestras de agua subterránea. Las líneas discontinuas muestran los valores límites establecidos para agua potable.....	209
Figura 6.11. Variación del rango de sulfatos de las 108 muestras de agua subterránea. La línea discontinua muestra el valor límite establecido para agua potable.....	211
Figura 6.12. Diagrama triangular representando las facies aniónicas y catiónicas predominantes en tanto por ciento en peso.....	213
Figura 6.13. Representación de la concentración de Zn en el agua subterránea de la UHSM.....	214
Figura 6.14. Representación de la concentración de Cd en el agua subterránea de la UHSM.....	215
Figura 6.15. Representación de la concentración de Ni en el agua subterránea de la UHSM.....	216
Figura 6.16. Representación de la concentración de Pb en el agua subterránea de la UHSM.....	217
Figura 6.17. Representación de la concentración de Sr en el agua subterránea de la UHSM.....	218
Figura 6.18. Representación de la concentración de Fe en el agua subterránea de la UHSM.....	219
Figura 6.19. Representación de la concentración de Mn en el agua subterránea de la UHSM.....	220
Figura 6.20. Representación de la concentración de B en el agua subterránea de la UHSM.....	221
Figura 6.21. Representación de la concentración de los metales (Pb, Cd, Ni, B, Fe y Mn) en las 108 muestras analizadas en la campaña del 2003 y el valor límite establecido para el consumo humano (ver Tabla 6.5).....	222
Figura 6.22. Valores de pH vs. Log C (concentración de metal) de las muestras de aguas subterráneas analizadas.....	224
Figura 6.23. Representación de las diferentes muestras de aguas en el diagrama para la clasificación de las aguas para riego según el procedimiento de U.S. Salinity Laboratory Staff (1954).....	226
Figura 6.24. Concentración de diferentes elementos en las aguas subterráneas en dos campañas de muestreo en los mismos puntos de agua de la UHSM. S) Sulfatos y b) Zn.....	228
Figura 6.25. Relación de la concentración de sulfatos con respecto a la concentración de Cd, Ni, Pb, Sr y Zn.....	232
Figura 7.1. Situación de muestras de suelos (capa arable) y sondeos de testigo (Rodríguez et al., 2002 a).....	236
Figura 7.2. a) Concentraciones de Pb total y bioasimilable en muestras de capa arable, b) Pb total versus Pb bioasimilable. Muestras tomadas entre las ramblas Beal y Ponce.....	237
Figura 7.3. a) Concentraciones de Zn total y bioasimilable en muestras de capa arable, b) Zn total versus Zn bioasimilable. Muestras tomadas entre las ramblas Beal y Ponce.....	238
Figura 7.4. a) Concentraciones de Cu total y bioasimilable en muestras de capa arable, b) Cu total versus Cu bioasimilable. Muestras tomadas entre las ramblas Beal y Ponce.....	239
Figura 7.5. a) Concentraciones de Cd total y bioasimilable en muestras de capa arable, b) Cd total versus Cd bioasimilable. Muestras tomadas entre las ramblas Beal y Ponce.....	240
Figura 7.6. Sondeos realizados entre las ramblas de Ponce y Beal, para reconocer la concentración de metales en profundidad. M: metros, Lit: litología y NP: nivel piezométrico (Rodríguez et al., 2002 a).....	241
Figura 7.7. Evolución de las concentraciones (ppm) de Pb, Zn, Cu y Cd total y bioasimilable en 3 sondeos con recuperación de testigo. Ramblas Ponce y Beal.....	243
Figura 7.8. Concentraciones de metales totales versus asimilables de tres sondeos, situados entre las ramblas del Beal y Ponce.....	244
Figura 7.9. Situación de puntos de muestreo de sedimentos en la rambla del Beal.....	245
Figura 7.10. Perfil longitudinal de concentración de metales, pH y CE, en los sedimentos de la rambla del Beal.....	246
Figura 7.11. Concentraciones de Pb total versus Pb bioasimilable en 6 plantas de la rambla del	248

Beal.....	
Figura 7.12. Cartografía de los residuos minero-metalúrgicos de la rambla del Beal. Sección del mapa original a escala 1:25000.....	250
Figura 7.13. Mapa de situación del Mar Menor.....	253
Figura 7.14. Mapa batimétrico de la laguna del Mar Menor (ITGE, 1990) y perfiles (del autor) donde se puede ver la variación de la profundidad en dos direcciones.....	254
Figura 7.15. A): Frecuencias anuales de las direcciones de los vientos (Castillo de Galeras-Cartagena). El nº del centro indica el porcentaje de calma. (Capel, 1986). B): Distribución de los vientos, según los datos anuales tomados del aeródromo de la Academia General del Aire de San Javier (Murcia) (Díaz del Río, 1993).....	255
Figura 7.16. a): entrada de agua al sistema lagoon costero procedente de los aportes continentales y marinos. b): comportamiento teórico de la circulación de las aguas en el interior del Mar Menor (Día del Río, 1993).....	256
Figura 7.17. Distribución de los sedimentos superficiales. (Simonneau, 1973).....	257
Figura 7.18. A): Textura de los sedimentos superficiales (relación gruesos-finos) donde se refleja la existencia de sedimentos arcillosos en el sector central del lagoon, siendo granocrecientes hacia sus bordes. B): Isopacas de la unidad deposicional “fango negro” (Díaz del Río, 1993).....	258
Figura 7.19. Representación de las características granulométricas de sedimentos del Mar Menor y de los residuos mineros.....	259
Figura 7.20. Esquema de la relación textura-carbonato en los sedimentos del Mar Menor. (IGME, 1990).....	260
Figura 7.21. Esquema de los gradientes de espesores de la unidad superior, deducidos de la interpretación de los registros sísmicos (Uniboom, 150 julios), tras realizar una conversión a metros, asumiendo una velocidad de propagación de la onda sísmica en el sedimento de 1800 m/s. (Díaz del Río, 1993).....	261
Figura 7.22. Contenido de metales en los sedimentos de la laguna del Mar Menor (ppm). a: Plomo, b: Cadmio, c: Cobre, d: Zinc, e: Hierro y f: Manganeseo. (De León et al., 1982).....	263
Figura 7.23. Perfiles de distribución de metales en los sedimentos de fondo en el Mar Menor 1) Isla Perdiguera, 2) Isla Mayor o del Barón y 3) La Manga del Mar Menor (en el caso de las Islas su perfil topográfico esta cortado). Los puntos representados en el perfil batimétrico N-S se corresponden con las muestras analizadas por Simonneau, (1975) y De León et al., (1985).	264
Figura 7.24. Concentración de metales en diferentes organismos marinos en el Mar Menor. Gráfica elaborada con los datos de la Tabla 7.6 (De León et al., 1982).....	267
Figura 7.25. Representación de las concentraciones de metales en <i>Ostrea edulis</i> (ostra plana) del Mar Menor. (Datos de la Tabla 7.7).....	269
Figura 7.26. Puntos de muestreo de <i>Cerastoderma edule glaucum</i> (almeja) y <i>Venerupis aurea</i> (almeja dorada) en el Mar Menor. (Auernheimer, 1984).....	271
Figura 7.27. Representación de la concentración de metales (ppm) en a) <i>Cerastoderma edule glaucum</i> (almeja) y b) <i>Venerupis aurea</i> (almeja dorada) en el Mar Menor. Elaborado con datos de la Tabla 7.8.....	271
Figura 7.28. Concentración media de metales, en diferentes plantas del Mar Menor. (Elaborada con datos de la Tabla 7.9).....	272
Figura 7.29. Evolución de la batimetría en la Bahía de Portman (Martínez, et al., 1993).....	275
Figura 7.30. Contenido de metales (ppm) en sedimentos de la Bahía de Portman. a: Cadmio, b: Zinc, c: Plomo. (Instituto Español de Oceanografía. Murcia, 1984).....	276
Figura 7.31. A): Localización de los puntos de muestreo: Bahía de Portman y playa La Vila. (Auernheimer, 1997). B): Localización de las tres estaciones donde se tomaron muestras de <i>Amphipholis squamata</i> (estrella de mar) en el Mar Mediterráneo (Bahía de Portman) (Dimitri,	277

2000).....	
Figura 7.32. Concentración de metales (ppm) en función de la distancia a la bahía de Portman (Elaborada con datos de la Tabla 7.10).....	278
Figura 7.33 Concentración de metales en dos variedades de erizo. a) En las placa. b) en las espinas. (Elaborado con datos de la Tabla 7.14 y 7.15).....	283
Figura 7.34. Valores medios de metales pesados (ppm) en macrohytas. Elaborada con datos de la Tabla 7.16.....	285
Figura 7.35. Modelo conceptual de formación de las costras de sulfatos y su erosión eólica.....	289
Figura 7.36. Distribución longitudinal del Pb en un perfil a través de la rambla El Beal y la línea de costa del Mar Menor. a) Perfil topográfico. b) Concentración de Pb en los diferentes materiales. c) Valores de pH.....	292
Figura 7.37. Distribución longitudinal del Zn en un perfil a través de la rambla El Beal y la línea de costa del Mar Menor. a) Perfil topográfico. b) Concentración de Pb en los diferentes materiales. c) Valores de pH.....	293
Figura 7.38. Distribución longitudinal del Cd en un perfil a través de la rambla El Beal y la línea de costa del Mar Menor. a) Perfil topográfico. b) Concentración de Pb en los diferentes materiales. c) Valores de pH.....	294
Figura 7.39. Distribución longitudinal del Cu en un perfil a través de la rambla El Beal y la línea de costa del Mar Menor. a) Perfil topográfico. b) Concentración de Pb en los diferentes materiales. c) Valores de pH.....	295
Figura 7.40. Mapa de zonación del impacto ambiental de la Sierra Minera y su radio de influencia.....	297
Figura 8.1. Abanico deposicional originado en la desembocadura de la rambla de La Carrasquilla, y que constituye la punta de la Lengua de la Vaca (Díaz del Río, 1993).....	302
Figura 8.2. Esquema geológico y situación de los perfiles que se muestran en la figura 8.3 (Rodríguez et al., 2002).....	305
Figura 8.3. Perfiles geológicos (marcados en la figura 8.2) con la situación de los sondeos y minas subterráneas (Rodríguez et al., 2002).....	306
Figura 8.4. Mapa sismotectónico del Campo y Sierra de Cartagena-La Unión. Elaborada con datos del IGN (Manteca et al., 2004 b). Base cartográfica original a escala 1:200000.....	307
Figura 8.5. Mapa de isosubsidencia. Relación con las minas subterráneas y la falla de “La Cierva”. (Rodríguez et al., 2002).....	309
Figura 8.6. Evolución de la subsidencia en diferentes puntos de control. (Mediciones semanales de Junio 1998 a Mayo 1999. Servicio de Cartografía de la C.A.R.M.) (Rodríguez et al., 2002)....	310
Figura 8.7. Masa de metal lixiviado en diferentes tipos de residuos y el pH de la fase sólida (Elaborada con datos de la Tabla 8.3).....	318
Figura 8.8. Concentración total de metales en diferentes tipos de residuos (Elaborada con datos de la Tabla 8.3).....	319
Figura 8.9. Variación de la conductividad eléctrica (CE) y del pH en los sondeos de dos balsas de lodos de flotación, a) El Lirio y b) Brunita (Elaborada con datos de la Tabla 8.5).....	321
Figura 8.10. Distribución de Pb total, soluble y bioasimilable en los sondeos de dos balsas de lodos de flotación, a) “El Lirio” y b) “Brunita” (Elaborada con datos de la Tabla 8.6).....	322
Figura 8.11. Distribución de Zn total, soluble y bioasimilable en los sondeos de dos balsas de lodos de flotación, a) El Lirio y b) Brunita (Elaborada con datos de la Tabla 8.7).....	324
Figura 8.12. Distribución de Cu total, soluble y bioasimilable en los sondeos de dos balsas de lodos de flotación, a) “El Lirio” y b) “Brunita” (Elaborada con datos de la Tabla 8.8).....	325
Figura 8.13. Distribución de Cd total, soluble y bioasimilable en los sondeos de dos balsas de lodos de flotación, a) El Lirio y b) Brunita (Elaborada con datos de la Tabla 8.9).....	326
Figura 8.14. Mapa de zonas de riesgo ambiental de la Sierra de Cartagena-La Unión. Mapa	329

reducido del original a escala 1:25000.....	
Figura A3.1.a. Espectro de energías dispersivas de rayos X. Muestra de gachero “Cielo1”.....	394
Figura A3.1.b. Imagen del área seleccionada en el espectro de la figura A3.1a.....	395
Figura A3.2.a. Espectro de energías dispersivas de rayos X. Muestra de gachero “Cielo2”.....	396
Figura A3.2.b. Imagen del área seleccionada en el espectro de la figura A3.2a.....	397
Figura A3.3.a. Espectro de energías dispersivas de rayos X. Muestra de gachero “Cielo3”.....	398
Figura A3.3.b. Imagen del área seleccionada en el espectro de la figura A3.3a.....	399
Figura A3.4.a. Espectro de energías dispersivas de rayos X. Muestra de gachero “Cielo4”.....	400
Figura A3.4.b. Imagen del área seleccionada en el espectro de la figura A3.4a.....	401
Figura A3.5.a. Espectro de energías dispersivas de rayos X. Muestra de lodo “Jenny1”.....	402
Figura A3.5.b. Imagen del área seleccionada en el espectro de la figura A3.5a.....	403
Figura A3.6.a. Espectro de energías dispersivas de rayos X. Muestra de lodo “Jenny2”.....	404
Figura A3.7.a. Espectro de energías dispersivas de rayos X. Muestra de lodo “Jenny3”.....	405
Figura A3.7.b. Imagen del área seleccionada en el espectro de la figura A3.7a.....	406
Figura A3.8.a. Espectro de energías dispersivas de rayos X. Muestra de rechazo de granulometría 1.....	407
Figura A3.8.b. Imagen del área seleccionada en el espectro de la figura A3.8a.....	408
Figura A3.9.a. Espectro de energías dispersivas de rayos X. Muestra de rechazo de granulometría 2.....	409
Figura A3.9.b. Imagen del área seleccionada en el espectro de la figura A3.9a.....	410
Figura A3.10.a. Espectro de energías dispersivas de rayos X. Muestra de rechazo de granulometría 3.....	411
Figura A3.10.b. Imagen del área seleccionada en el espectro de la figura A3.10a.....	412
Figura A4.1.a. Ficha para toma de datos en campo.....	413
Figura A4.1.b. Ficha para toma de datos en campo.....	414

ÍNDICE DE TABLAS

DESCRIPCIÓN	No página
Tabla 1.1. Relación de algunos ejemplos del impacto ambiental de las actividades minero-metalúrgicas, en diferentes condiciones geográficas (Modificado de Rodríguez, 2002).....	6
Tabla 1.2. Características físicas de residuos minero-metalúrgicos almacenados en presas y escombreras (<i>tailing dam</i>). Valores medios indicativos (Rodríguez, 2002).....	16
Tabla 1.3. Sustancias químicas que afectan a la potabilidad del agua.....	33
Tabla 1.4. Valores límite en las personas. ATSDR – Nivel mínimo de riesgo para sustancias peligrosas (MRLs).....	34
Tabla 2.1. Características de las ramblas de la Sierra de Cartagena-La Unión.....	38
Tabla 2.2. Valores calculados para la Evapotranspiración potencial y real (Periodo 1975-1998).....	45
Tabla 2.3. Valores de velocidad del viento (km/h) en la Estación aeródromo de San Javier. Periodo: 1961-1990.....	46
Tabla 2.4. Principales características de los “mantos” y zonas mineras donde han sido localizados y explotados.....	76
Tabla 2.5. Valores del peso específico de minerales y ganga (Hurlbut y Klein, 1989).....	82
Tabla 2.6. Reactivos empleados en el proceso de flotación diferencial (Informe interno Peñarroya, 1980).....	85
Tabla 3.1. Resumen de puntos de muestreo de agua por cuencas.....	102
Tabla 3.2. Normas de Ensayos de Aguas utilizadas por el laboratorio CAASA.....	102
Tabla 3.3. Número de muestras para caracterización de granulometrías en los distintos tipos de residuos.....	103
Tabla 3.4. Normas de Ensayos Geotécnicos.....	105
Tabla 4.1. Características de los diferentes apartados que componen la ficha de campo.....	109
Tabla 4.2. Distribución de los pozos mineros en los mapas topográficos regionales.....	110
Tabla 4.3. Características de las cortas mineras explotadas en la Sierra de Cartagena-La Unión.....	124
Tabla 4.4. Estado actual de las cortas explotadas en la Sierra Minera.....	124
Tabla 4.5. Clasificación de los diferentes tipos de residuos minero metalúrgicos.....	126
Tabla 4.6. Extensión y volumen ocupado por los depósitos de residuos mineros y cortas.....	128
Tabla 4.7. Distribución de los depósitos de residuos mineros por cuencas hidrográficas de ramblas.....	128
Tabla 4.8. Valoración de reservas de mineral de la Sierra de Cartagena-La Unión. Agosto 2004.....	133
Tabla 4.9. Elementos del patrimonio minero.....	136
Tabla 5.1. Extensión y volumen ocupado por los vacíos de estéril de corta.....	142
Tabla 5.2. Resultados en % de los análisis de rocas de la Sierra de Cartagena-La Unión.....	143
Tabla 5.3. Composición mineralógica de los estériles de corta (% en peso semicuantitativo).....	144
Tabla 5.4. Composición química de los estériles de corta de minas (% en peso).....	145
Tabla 5.5. Extensión y volumen ocupado por los lodos de flotación depositados en tierra.....	149
Tabla 5.6a. Valores de permeabilidad en dos balsas de lodos de flotación (Faz el at., 2003a y b)	151
Tabla 5.6b. Características geotécnicas de los lodos de flotación (MOPTMA, 1996).....	152
Tabla 5.7. Composición mineralógica de los lodos de flotación (% en peso semi-	153

cuantitativo).....	
Tabla 5.8. Composición química de muestras de lodos de flotación en tierra.....	154
Tabla 5.9. Contenido en metales de lodos de flotación. Concentración en ppm.....	154
Tabla 5.10. Extensión y volumen ocupado por los lodos de flotación vertidos al Mar Mediterráneo.....	163
Tabla 5.11. Composición mineralógica de los lodos de flotación depositados en el mar (% en peso semicuantitativo).....	164
Tabla 5.12. Composición química de muestras de lodos de flotación vertidos al Mar Mediterráneo.....	165
Tabla 5.13. Extensión y volumen ocupado por las terreras de gravimetría.....	166
Tabla 5.14. Composición mineralógica de los estériles de gravimetría (% en peso semicuantitativo).....	168
Tabla 5.15. Composición química de los estériles de gravimetría.....	169
Tabla 5.16. Composición química, en %, de 5 muestras de gravimetría (Julio 2003).....	169
Tabla 5.17. Extensión y volumen ocupado por las escombreras de estéril de mina.....	170
Tabla 5.18. Composición mineralógica de los estériles de mina. Muestras P-E8 (% en peso semicuantitativo).....	171
Tabla 5.19. Composición química de las escombreras de estériles de mina. Muestra P-E8.....	172
Tabla 5.20. Extensión y volumen ocupado por las escombreras de óxidos.....	173
Tabla 5.21. Composición petrológica en tanto por ciento en peso.....	175
Tabla 5.22. Composición mineralógica de los óxidos (% en peso semicuantitativo).....	176
Tabla 5.23. Composición química de las escombreras de óxidos. Valor medio de 4 muestras: 2 en “Erizo” y 2 en “Esmeralda”.....	177
Tabla 5.24. Composición química en elementos y óxidos mayoritarios. Composición química expresada en por ciento en peso. Para la plata (g/t).....	178
Tabla 5.25. Extensión y volumen ocupado por los montones de rechazo de granulometría.....	179
Tabla 5.26. Composición mineralógica del rechazo de granulometría (% en peso).....	180
Tabla 5.27. Composición química del rechazo de granulometría.....	181
Tabla 5.28. Extensión y volumen ocupado por las acumulaciones de escoria de fundición.....	182
Tabla 5.29. Composición mineralógica de las gachas de fundición (% en peso semicuantitativo).....	183
Tabla 5.30. Composición química de las gachas de fundición (% en peso).....	183
Tabla 5.31. Extensión y volumen ocupado por las escombreras de los pozos mineros.....	184
Tabla 5.32. Composición mineralógica de los estériles de pozo (% en peso semicuantitativo).....	185
Tabla 5.33. Composición química de los estériles de pozos mineros (% en peso).....	186
Tabla 6.1. Características físico-químicas del agua de lluvia (DT= Desviación estándar, TDS: Total de sólidos disueltos).....	194
Tabla 6.2. Rangos de variación de las diferentes propiedades físico-químicas del agua de escorrentía de la rambla el Beal (mg/L). Valores medios (Med), valores mínimos (Mín), valores máximos (Max), desviación típica (DT) y valores paramétricos (v. p.), son los niveles máximos marcados por cada normativa, * española (R. D. 140/2003) y ** europea (98/83/CE).....	197
Tabla 6.3. Propiedades físico-químicas del agua de dos cortas mineras. Valores paramétricos (v.p.) que son los niveles máximos marcados por cada normativa, * española (R. D. 140/2003) y ** europea (98/83/CE).....	200
Tabla 6.4. Propiedades físico-químicas de las aguas de surgencias de galerías de mina. Valores paramétricos (v.p.) que son los niveles máximos marcados por cada normativa, * española (R. D. 140/2003) y ** europea (98/83/CE).....	203

Tabla 6.5. Rangos de variación de las diferentes propiedades físico-químicas de las aguas subterráneas de la UHSM para 108 muestras. Valores medios (Med), valores mínimos (Min), valores máximos (Max), desviación típica (DT) y valores paramétricos (v.p.), son los niveles marcados por cada normativa, * española (R.D. 140/2003) y ** europea (98/83/CE).....	210
Tabla 7.1. Concentración de metales totales (ppm), pH y C.E. en muestras de sedimentos de la rambla del Beal. Valores medios de 5 muestras.....	245
Tabla 7.2. Concentración de Pb total en suelo y en plantas autóctonas (ppm). Rambla del Beal. Número de muestras: 5 (Hernández et al., 2004).....	247
Tabla 7.3. Resultados de las determinaciones de metales pesados en 2 ejemplares de águila perdicera (Ambiental, S.L., 1997).....	249
Tabla 7.4. Concentración de metales en los sedimentos del Mar Menor.....	261
Tabla 7.5. Concentraciones de metales en el agua del Mar Menor.....	265
Tabla 7.6. Resultados de metales en organismos de la laguna del Mar Menor (ppm peso húmedo). Nº muestras 130 (De León et al., 1982).....	266
Tabla 7.7. Concentración de metales en <i>Ostrea edulis</i> (ostra plana) del Mar Menor (Rosique, 2000).....	269
Tabla 7.8. Concentración en ppm de Fe, Zn y Mn en conchas de <i>Cerastoderma edule glaucum</i> (almeja) y <i>Venerupis aurea</i> (almeja dorada) en el Mar Menor para 8 muestras (Auernheimer, 1984).....	270
Tabla 7.9. Metales pesados contenidos en una muestra de macrophytas* del Mar Menor (Sanchiz, 2000).....	272
Tabla 7.10. Concentraciones (valor medio \pm SD; Dutrieux, 1997) de 5 metales pesados en los sedimentos de fondo en 3 estaciones investigadas (Deheyn, 2000).....	276
Tabla 7.11. Concentración de elementos (ppm) en 10 muestras de sedimentos y substrato de la Bahía de Portman y Playa La Vila (Auernheimer, 1997).....	278
Tabla 7.12. Concentración de elementos (ppm) en muestras de agua de las Bahía de Portman y Gorguel, y de la playa La Vila Muestras tomadas en Julio 2003.....	279
Tabla 7.13. Concentración de elementos (ppm) en muestras de agua en varios puntos del Mediterráneo (IEO, 1984).....	280
Tabla 7.14. Comparación de metales contenidos (ppm) en <i>Paracentrotus lividus</i> (erizo rojo) de la Bahía de Portman y Playa La Vila (Auernheimer, 1997) y en peces de cefalópodos en la bahía de Portman (IEO).....	281
Tabla 7.15. Comparación de elementos contenidos (ppm) en <i>Arbacia lixula</i> (erizo negro) de la Bahía de Portman y Playa La Vila. (Auernheimer, 1997).....	284
Tabla 7.16. Metales pesados (ppm) contenidos en las macrohytas del Mediterráneo (Sanchiz, 2000).....	284
Tabla 7.17. Relación de minerales del grupo de los sulfatos que aparecen en la Sierra Minera.....	287
Tabla 8.1. Determinación de la tasa de erosión en la balsa de lodos de flotación denominada Rosa.....	304
Tabla 8.2. Determinación de los tonelajes erosionados, por efecto del agua de lluvia y escorrentía, en las balsas de flotación.....	304
Tabla 8.3. Concentración de metales en el agua para cada una de las extracciones realizadas (ratio de 1:10 (10 gramos de suelo en 100 mL de agua Milli-Q. Extracciones en agua Milli-Q. La extracción se ha realizado de acuerdo al procedimiento de la norma alemana DIN38414 S4..	317
Tabla 8.4. Determinación de la concentración de metal en el solución extractante resultante del ataque con agua regía (ratio 1:3; 3 mL HCL y 1mL HNO ₃) de 8 residuos de la Sierra de Cartagena-La Unión.....	319
Tabla 8.5. Conductividad eléctrica y pH en las balsas de “El Lirio” y “Brunita” (Faz et al.,	321

2003 a y b).....	
Tabla 8.6. Concentración de Pb total, soluble y bioasimilable en los sondeos de las balsas de “El Lírio” y “Brunita” (Faz et al., 2003 a y b).....	322
Tabla 8.7. Concentración de Zn total, soluble y bioasimilable en los sondeos de las balsas “El Lírio” y “Brunita” (Faz et al., 2003 a y b).....	323
Tabla 8.8. Concentración de Cu total, soluble y bioasimilable en los sondeos de las balsas de El “Lírio” y “Brunita” (Faz et al., 2003 a y b).....	325
Tabla 8.9. Concentración de Cd total, soluble y bioasimilable en los sondeos de las balsas “El Lírio” y “Brunita”.....	326
Tabla 9.1. Contenido (ppm) de metales pesados biodisponibles en los lodos de flotación. (Faz et al., 2004 a y b).....	334
Tabla 9.2. Volumen de agua almacenado en las cortas Brunita y Los Blancos–II (Septbre 2004)	341
Tabla A2.1. Principales características de las estaciones meteorológicas. T = Termicas; P = Pluviométricas.....	390
Tabla A2.1. Principales características de las estaciones meteorológicas. T = Térmicas; P = Pluviométricas.....	390
Tabla A2.2. Precipitaciones medias anuales (mm).....	391
Tabla A2.3. Precipitaciones medias mensuales (mm). Periodo 1975-1998.....	392
Tabla A2.4. Temperaturas medias anuales. Periodo 1975-1998.....	392
Tabla A2.5. Temperaturas medias mensuales. Periodo 1975-1998.....	393

ÍNDICE DE FOTOS

DESCRIPCIÓN	No página
Foto 1.1. Intersección del nivel freático en la corta Brunita. Sierra de Cartagena-La Unión.....	10
Foto 2.1. Esquistos grafitosos del Paleozoico. Cerro al norte de El Coto.....	56
Foto 2.2. Detalle de la foto anterior. Se pueden apreciar intercalaciones de cuarcitas en los esquistos..	56
Foto 2.3. Contacto entre los esquistos grafitosos de Paleozoico (izquierda) y esquistos claros y cuarcitas blancas del Permo-Trias. Cerro al norte de El Coto.....	56
Foto 2.4. Esquistos grafitosos del Paleozoico, en la base del cerro, y mármoles del Nevado-Filábride superior, en la cima. Entre ambos materiales, cubiertos por la vegetación, están los esquistos claros y cuarcitas.....	56
Foto 2.5. Sill de roca volcánica (metabasitas) caolinizada, dentro de los esquistos grafitosos del Paleozoico. Cerro al norte de El Coto.....	58
Foto 2.6. Mármoles fajeados Nevado-Filábrides, donde se aprecian los micropliegues y la fracturación.....	58
Foto 2.7. Detalle de los mármoles Nevado-Filábrides intensamente plegados y fracturados. Falda norte de la sierra litoral, próxima a las Cenizas (Portman).....	58
Foto 2.8. Mármoles fajeados, con fracturas abiertas. Falda norte de la sierra litoral, en las proximidades de las Cenizas (Portman).....	58
Foto 2.9. Cuarcitas blancas del Nevado Filábride superior, con fuerte buzamiento hacia el sur. Falda norte de la sierra litoral, al sur de las urbanizaciones del campo de golf de Atamaría (Los Belones).....	58
Foto 2.10. Detalle de la foto anterior, que muestra la intensa fracturación que presentan las cuarcitas blancas.....	58
Foto 2.11. Dolomías marrones alpujárrides de la Unidad de San Ginés. Cerro del Puntal.....	59
Foto 2.12. Detalle de la foto anterior, donde se puede apreciar la karstificación y porosidad secundaria de las dolomías de San Ginés. Cerro del Puntal.....	59
Foto 2.13. Materiales alpujárrides, de la unidad de Portman, con filitas violeta en la base del cerro y dolomías crema al techo. Cerros al sur de las urbanizaciones del campo de golf de Atamaría (Los Belones).....	60
Foto 2.14. Relieve correspondiente a la Unidad de Portman. Contacto entre filitas violeta a la base del cerro, y dolomías grises en la parte alta. Collado de la carretera de Atamaría a Portman.....	60
Foto 2.15. Dolomías grises “cebradas” de la Unidad de Portman. Cerro junto al club Campo de Golf. Atamaría (Los Belones-Cartagena).....	60
Foto 2.16. Detalle de las dolomías grises “cebradas” de la foto anterior.....	60
Foto 2.17. Limolitas y argilitas del Mioceno. Sierra de Ponce (Llano del Beal).....	61
Foto 2.18. Conglomerados miocenos, parcialmente mineralizados. Sierra de Ponce (Llano del Beal)...	61
Foto 2.19. Castillete y casa de máquinas del pozo de extracción de la mina San Ignacio, en materiales del mioceno, en la sierra de Ponce (Llano del Beal).....	62
Foto 2.20. Materiales del Mioceno en la sierra de Ponce. Las rocas que resaltan son conglomerados, y el resto son argilitas y limolitas principalmente.....	62
Foto 2.21. Costra calcárea de evapotranspiración (caliche) del Cuaternario. Falda Sur de la Sierra de Ponce.....	63
Foto 2.22. Plano de falla en materiales del Mioceno. Se trata de una fractura mineralizada, de dirección N-130°.....	65
Foto 2.23. Mina Remunerada, en la carretera del 33. Filón de unos 200 m de longitud, 8 m de potencia media, más de 50 m de profundidad. A la izquierda brecha mineralizada en estaño. Junio 2004.....	77

Foto 2.24. Filón La Raja en el Cabezo Rajao, de 600 m de longitud, 10 m de potencia media y 300 m de profundidad. Año 1998.....	77
Foto 2.25. Mina Agrupa Vicente. Carretera del 33. La Unión, junio 2004.....	79
Foto 2.26. Corta Sultana. Oeste de la sierra de Cartagena-La Unión. (área: 0,306 km ² , ejes: 500x800 m, profundidad: 200 m). Junio 2004.....	80
Foto 2.27. Carga y transporte.....	81
Foto 2.28. Carga auxiliada por bulldozer.....	81
Foto 2.29. Rumbo (Botella, 1868).....	83
Foto 2.30. Lavadero de la Cuesta de las Lajas. Junio 2004.....	83
Foto 2.31. Panorámica de las instalaciones minero-metalúrgicas de la empresa Real Compañía Asturiana de Minas, en el coto minero de Ponce (Llano del Beal-Cartagena). Año 1974.....	87
Foto 2.32. Horno de Fundición. Ctra La Unión-El Gorguel. Junio 2004.....	88
Foto 2.33. Horno de Fundición. Estrecho de San Ginés. Junio 2004.....	88
Foto 2.34. Cartel anunciador de la ruta minera. Junio 2004.....	91
Foto 2.35. Cartel anunciador de la ruta minera. Junio 2004.....	91
Foto 2.36. Castillete de la mina Las Matildes, en restauración. Agosto 2004.....	91
Foto 2.37. Castillete de la mina Blanca. Agosto 2004.....	91
Foto 2.38. Localización de la mina Agrupa Vicenta, en la ctra. del 33.....	92
Foto 2.39. Interior de la mina Agrupa Vicenta.....	92
Foto 2.40. Cartel anunciador de la importancia del yacimiento paleontológico de Cueva Victoria..	92
Foto 2.41. Interior de la primera cavidad de la cueva. Continúan las excavaciones por el equipo del profesor Gubert. Agosto 2004.....	92
Foto 3.1. Medida de nivel en un pozo minero.....	101
Foto 3.2. Toma de muestras de agua en un pozo minero.....	101
Foto 4.1. Protección de ladrillo.....	114
Foto 4.2. Protección de bloques.....	114
Foto 4.3. Protección de mampostería.....	114
Foto 4.4. Protección de bloques-mampostería.....	114
Foto 4.5. Protección de hormigón.....	115
Foto 4.6. Protección de alambrada.....	115
Foto 4.7. Protección de piedra.....	115
Foto 4.8. Sin protección.....	115
Foto 4.9. Embudo en la boca del pozo C-309.....	117
Foto 4.10. Embudo en la boca del pozo 978-12 167-C22.....	117
Foto 4.11. Castillete de mampostería.....	121
Foto 4.12. Castillete de madera de la mina San Simón. La Parreta (Alumbres).....	121
Foto 4.13. Castillete de hierro de la mina Montserrat. Cabezo Rajao.....	122
Foto 4.14. Chimenea de máquina de vapor de la mina San Fco. Javier. Ctra del Gorguel.....	122
Foto 4.15. Hornos de Fundición de manganeso. El Descargador (La Unión).....	122
Foto 4.16. Malacate de madera. Entrada de Cantera Emilia.....	122
Foto 4.17. Cantera Las Balsetas. Escombreras-Cartagena.....	131
Foto 4.18. Aprovechamiento de la corta Los Blancos para áridos artificiales.....	131
Foto 5.1. Vacies de la corta Los Blancos, al este del Llano del Beal.....	142
Foto 5.2. Vacies de la corta Brunita. Carretera de La Unión a Portman.....	142
Foto 5.3. Emplazamiento en exenta. Portman.....	146
Foto 5.4. Emplazamiento en ladera. Ctra de La Unión al Gorguel.....	146
Foto 5.5. Emplazamiento en valle. El Descargador.....	146
Foto 5.6. Sistema constructivo de las balsas de lodos. Colocación de troncos para conseguir más	147

altura.....	
Foto 5.7. Colocación de tabloncillos entre los troncos para evitar derrames de lodo.....	147
Foto 5.8. Balsa de lodos de flotación. Emplazamiento en exenta. Mina San Fco Javier, carretera del Gorguel.....	149
Foto 5.9. Estratificación cruzada festoneada, indicando superposición de corrientes con distintas direcciones Balsa La Peraleja.....	156
Foto 5.10. Paleocanales. Balsa La Peraleja.....	156
Foto 5.11. Elipsita. Balsa La Peraleja.....	156
Foto 5.12. Elipsita. En la base muestra un contacto erosivo. Balsa La Peraleja.....	156
Foto 5.13. Elipsitas circulares. Balsa La Peraleja.....	157
Foto 5.14. Elipsita circular, con surcos en capa de cebolla. Balsa La Peraleja	157
Foto 5.15. Convolutes lamination. Balsa San Lorenzo (Cabezo Rajao).....	15
Foto 5.16. Mud crack. Grietas rellenas. Balsa La Peraleja	159
Foto 5.17. Mud crack. Grietas abiertas que se están rellenando. Balsa La Peraleja	159
Foto 5.18. Gotas de lluvia con concavidad hacia arriba. Balsa La Peraleja	160
Foto 5.19. Gotas de lluvia recientes, con concavidad hacia arriba. Balsa La Peraleja	160
Foto 5.20. Dique de arena cortando estratos. Balsa San Lorenzo (Cabezo Rajao).....	161
Foto 5.21. Dique de arena cortando estratos. Se manifiestan en la parte superior de la balsa a modo de crestas. Balsa San Lorenzo (Cabezo Rajao).....	161
Foto 5.22. Volcán de arena abombado. Balsa La Peraleja	161
Foto 5.23. Volcán de arena perforado. Balsa La Peraleja	161
Foto 5.24. Vista general del lavadero Roberto en Portman (La Unión-Murcia), en el fondo a la derecha puede apreciarse la Bahía colmatada.....	162
Foto 5.25. a): Playa antrópica en la bahía de Portman, creada por el vertido directo al mar de los lodos del lavadero Roberto, propiedad de la S.M.M.Peñarroya-España, durante los años 1957 a 1991. b): Playa antrópica en la bahía del Gorguel, creada por el mismo material y empresa que la de la foto anterior.....	163
Foto 5.26. Terrera de gravimetría. Minera Celdrán (Llano del Beal).....	166
Foto 5.27. Terrera de estéril de mina. Carretera del Gorguel.....	170
Foto 5.28. Monteras de Óxidos (gossan) de la corta San Valentín.....	173
Foto 5.29. Escombrera de Óxidos (gossan) Erizo. Situada a la entrada de la corta Emilia.....	173
Foto 5.30. Escombrera de Rechazo de Granulometría. Coto Ponce. El Lirio.....	178
Foto 5.31. Detalle de la foto anterior.....	178
Foto 5.32. Escorias de fundición. Cuevas de Roma (El Descargador-La Unión).....	182
Foto 5.33. Detalle de la foto anterior.....	182
Foto 5.34. Escombrera de pozo minero.....	184
Foto 5.35. Se pueden observar dos tipos de residuos. En la parte inferior gacheros de fundición y en la superior lodos de flotación.....	188
Foto 6.1. a) Costras de sulfatos en la balsa de lodos “Brunita”. B) Nube de polvo generada sobre la superficie de la balsa de lodos “Rosa”. Rambla del Beal.....	196
Foto 6.2. Escorrentía superficial en la rambla El Beal (desagua en el Mar Menor).....	198
Foto 6.3. Escorrentía superficial en la rambla del Gorguel (desagua en el mar Mediterráneo).....	198
Foto 6.4. Intercepción del nivel piezométrico por las actividades mieras a cielo abierto. Corta Los Blancos-II.....	199
Foto 6.5. Intercepción del nivel piezométrico por las actividades mieras a cielo abierto. Corta Brunita.....	199
Foto 6.6. Galería de mina, en la rambla de Portman.....	202
Foto 6.7. Galería de mina. Túnel Lilian, en la corta Gloria.....	202
Foto 6.8. a) Costras de sulfatos con diferentes tonalidades en la superficie de las balsas de lodos.	231

b) Erosión por el escurrimiento superficial de las aguas meteóricas. Se observa además la ausencia de muro de contención y de vegetación en la superficie y talud de la balsa.....	
Foto 7.1. En la imagen del satélite resalta en color morado la superficie ocupada por la Sierra Minera y el área de afectada por la deposición de sedimentos ricos en las ramblas del Beal, Ponce y Carrasquilla, en el Mar Menor y la del Gorguel en el Mediterráneo. El color verde corresponde a las zonas de cultivo.....	235
Foto 7.2. Imágenes de las plantas analizadas de la rambla del Beal.....	248
Foto 7.3. Águila perdicera (http://www.internatura).....	249
Foto 7.4. Obras de encauzamiento en la rambla de Portman.....	251
Foto 7.5. Detalle de los gaviones de la rambla de Portman.....	251
Foto 7.6. Lodos de flotación aterrazados, en el curso medio de la rambla del Gorguel.....	251
Foto 7.7. Lodos de flotación en la desembocadura de la rambla del Gorguel.....	251
Foto 7.8. a). Superficie de una balsa por la que circula el agua de escorrentía, erosionándola. b) En el talud de la balsa se observan un gran desarrollo de cárcavas, a consecuencia del proceso de erosión por el agua de lluvia, observado en la foto anterior.....	259
Foto 7.9. Orilla del Mar Menor donde se observa la gran acumulación de conchas de animales muertos, en las proximidades de la rambla La Carrasquilla.....	260
Foto 7.10. Imágenes de la fauna en la que se analiza la concentración de metales que se relaciona en la tabla 7.7.....	268
Foto 7.11. Imágenes de la tabla 7.8.....	270
Foto 7.12. Imágenes de la tabla 7.9.....	273
Foto 7.13. Tubería del vertido de lodos, procedentes del proceso de flotación diferencial, a 400 m al Oeste de Punta Galera (González y Baños, 1987).....	274
Foto 7.14. Imágenes de las tablas 7.14 y 7.15.....	282
Foto 7.15. En primer plano los vacíos de estériles de la corta Brunita, de tonos grises y azulados. Al fondo el Cabezo Rajao.....	286
Foto 7.16. Ruinas del lavadero de la mina San Lorenzo, rodeadas por las balsas de lodos de flotación.....	286
Foto 7.17. Piping en la balsa de lodos Brunita.....	288
Foto 7.18 a) y b). Zonas con encharcamiento de agua dentro de la balsa de lodos del Lirio.....	288
Foto 7.19. Palos podridos en el talud de la balsa que servían para mantener el lodo.....	288
Foto 8.1. Acumulación de 50 cm de sedimentos transportados por el viento. El color claro se debe a la alta concentración de sulfatos >60%. Balsa “El Lirio”.....	300
Foto 8.2. Igual a la foto anterior, pero la capa de sedimentos es de poca potencia (5 cm).....	300
Foto 8.3. Cárcavas producidas por efecto de la erosión hídrica en una escombrera de gravimetría de 2ª Paz, al sur del Llano del Beal. Para tener una idea de la magnitud del proceso, obsérvese el jalón de un metro de altura, y la grieta abierta en la roca de la parte superior izquierda de la foto...	301
Foto 8.4. Acumulación de cantos arrancados de la base de los depósitos de residuos de la cuenca de la rambla del Beal.....	302
Foto 8.5. Abanico deposicional en la desembocadura de la Lengua de la Vaca.....	303
Foto 8.6. Acumulación de lodos de flotación a orillas del mar, en la punta Lengua de la Vaca. (Los Nietos, Cartagena).....	303
Foto 8.7. Parcela experimental en la balsa de lodos de flotación Rosa.....	303
Foto 8.8. Grieta nº 38 localizada frente a las Casas de la mina La Cierva. Obsérvese la amplitud de la misma en relación con el martillo.....	310
Foto 8.9. Grieta nº 35, decimétrica, en el porche interior de la nave de “Sondeos Cabezos”.....	310
Foto 8.10. Cerro de Don Juan. Cantera Emilia.....	313
Foto 8.11. Hundimiento de la mina Remunerada en el año 1970, en las proximidades de la corta San Valentín.....	313

Foto 8.12. Colapso producido en la balsa de lodos “Marqués de Pejas”.....	314
Foto 8.13. Efectos del hundimiento sobre los árboles.....	314
Foto 8.14. Grietas sobre el pantano.....	314
Foto 8.15. Detalle de grietas que se unen.....	314
Foto 8.16. Rotura de la balsa Brunita.....	315
Foto 8.17. Detalle de la foto anterior. Obsérvese la zona del deslizamiento de los lodos.....	315
Foto 8.18. a) y b): desplomes en balsas de lodos de flotación.....	316
Foto 9.1. <i>Zigophyllum fabago</i>	334
Foto 9.2. Germinación de semillas de <i>Zigophyllum fabago</i> sobre residuo.....	334
Foto 9.3. Panorámica del área afectada por presencia de sales solubles. Junto al núcleo urbano del “Llano del Beal”.....	335
Foto 9.4. Detalle de sales precipitadas sobre los residuos mineros. Balsa de lodos “La Esperanza”.	335
Foto 9.5. Estructura masiva o coherente cementada por la presencia de óxidos de hierro resultado de la alteración de los sulfuros.....	336
Foto 9.6. Estructura particular o suelta en proceso de estabilización por <i>Amophyla arenaria</i>	336
Foto 9.7. Rotura del brocal en el pozo 117-C167.....	339
Foto 9.8. Presa de residuos en la cabecera de la rambla La Carrasquilla.....	340
Foto 9.9. Aguas debajo de la presa de la rambla La Carrasquilla.....	340
Foto 9.10. Laguna en la corta Brunita.....	341
Foto 9.11. Laguna en la corta Los Blancos-II.....	341
Foto 9.12. Carga y transporte de los lodos de la balsa “Jenny” (Septiembre 2004).....	342
Foto 9.13. Descarga de los lodos procedentes de la balsa Jenny a la corta Los Blancos-I (Septiembre 2004).....	342
Foto 9.14. Capa de tierra de 20 cm situada sobre los lodos de flotación. Balsa “Marqués de Pejas”	344
Foto 9.15. <i>Tetraclinis articulata</i> , desarrollado sobre la balsa restaurada “Marqués de Pejas”.....	344
Foto 9.16. Erosión en cárcavas y ausencia de vegetación en la balsa “Marqués de Pejas”.....	344
Foto 9.17. Rotura de la red de drenaje.....	344

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

ABREVIATURA

AMD	Drenaje ácido de minas
ATSDR	Agency for toxic substances and disease registry
BH	Bloque hidrogeológico
BIC	Bienes de Interés Cultural
BOE	Boletín Oficial del Estado
CAAMA	Consejería de Agricultura, Agua y Medio Ambiente
CARM	Comunidad Autónoma de la Región de Murcia
CE	Comunidad Europea; Conductividad Eléctrica
CHS	Confederación Hidrográfica del Segura
DGMN	Dirección General del Medio Natural
dl	Decilitro
DT	Desviación estándar
DUR	Dureza total
EIA	Estudio de Impacto Ambiental
EM	Estructuras Mineras
ENADIMSA	Empresa Nacional Adaro de Investigación Mineras, S.A.
ENP	Espacios Naturales Protegidos
g/l	Gramos por litro
IEO	Instituto Español de Oceanografía
IGME	Instituto Geológico y Minero de España
INM	Instituto Nacional de Meteorología
ITC	Instrucción Técnica Complementaria
ITGE	Instituto Tecnológico Geominero de España
kg	Kilogramo
kt	Miles de toneladas
LFM	Lodos de Flotación vertidos al Mar
LIA	Lugares de Interés Arqueológico
LIAIM	Lugares de Interés Arqueo-Industrial Minero
LIC	Lugares de Importancia Comunitaria
LIG	Lugares de Interés Geológico
L/m	Litros por metro
mg	Miligramos
Mm ³	Millones de metros cúbicos
MOPTMA	Ministerio de Obras Públicas, Transporte y Medio Ambiente
MOPT	Ministerio de Obras Públicas y Transportes
MOPU	Ministerio de Obras Públicas
MRLs	Minimal risk levels for hazardous substances
Mt	Millones de toneladas
NP	Nivel Piezométrico
OMS	Organización Mundial de la Salud
ppb	Partes por billón
ppm	Partes por millón
RD	Real Decreto
RENP	Red de Espacios Naturales Protegidos
RMM	Residuos minero-metalúrgicos

SAIT	Servicio de Atención a la Investigación Tecnológica
SM	Sierra Minera
SMMPE	Sociedad Minero Metalúrgica de Peñarroya-España
TAC	Alcalinidad total
TSD	Total de Sólidos Disueltos
UHSM	Unidad Hidrogeológica Sierra Minera
UPC	Universidad Politécnica de Cataluña
UPCT	Universidad Politécnica de Cartagena
V.P.	Valor Paramétrico
Z	Altitud de un punto
ZEPAS	Zonas de Especial Protección para las Aves
ZEPIM	Zonas Especialmente Protegidas de Importancia para el Mediterráneo

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

La extracción de los recursos minerales ha generado grandes beneficios que, en algunos casos, ha supuesto el desarrollo industrial y social de su entorno. Asociado a la explotación de las menas beneficiables se han generado gran cantidad de residuos minero-metalúrgicos, derivados tanto del proceso extractivo como del de transformación. Estos residuos suponen un impacto y riesgo para el medio ambiente. La falta de una legislación adecuada en su momento, la permisividad de las administraciones y la falta de sensibilidad medioambiental de las empresas, ha contribuido a que los residuos no se hayan tratado adecuadamente en el momento de su generación y no se evitaran sus efectos negativos.

Los términos impacto y riesgo ambiental se han generalizado ampliamente en la literatura relativa al medio ambiente, para evaluar o designar las actuaciones antrópicas sobre el medio natural y sus ecosistemas. Las relaciones fundamentales entre el medio físico y las actividades antrópicas que en él se desarrollan pueden analizarse estableciendo el efecto que las actividades humanas desarrolladas en el pasado, las que se efectúan en el presente o previstas para el futuro (potenciales) han producido, producen o producirán en el medio ambiente.

El **impacto ambiental** constituye el efecto de las actividades antrópicas sobre el medio ambiente y sus ecosistemas. La trascendencia de éste deriva de la importancia de las actividades y de la vulnerabilidad del medio natural del territorio donde aquellas se desarrollan.

El **riesgo ambiental** se refiere a la probabilidad de ocurrencia de un impacto, sobre todo de aquellas circunstancias de carácter no periódico, pero que encierran una gravedad de magnitudes excepcionales para el medio natural.

Los puntos de vista, desde los que se pueden contemplar las consecuencias y transformaciones, que sobre el medio ambiente ha realizado el hombre o pueden acontecer, son varias:

I) Impactos ecológicos ambientales o indirectos. Producen modificaciones en los sistemas naturales. Su identificación, evaluación y análisis presupone una medida de los cambios operados, cuya incidencia sea importante en el funcionamiento de los sistemas que conforman el medio ambiente estudiado.

II) Impactos sociales o directos. Afectan directamente a los seres humanos (individuo), los seres vivos (en grupo o aislados) o grupos de ecosistemas. En este caso se realiza el estudio y evaluación en el medio donde se produce el impacto.

La relación entre impacto y riesgo ambiental se determina a la hora de evaluar la importancia o magnitud de los mismos. El grado de impacto de las actividades antrópicas depende de las condiciones y de las diferentes variables ambientales que caractericen el territorio donde se localizan, entre las que se encuentran: la fragilidad de los ecosistemas que conforman el medio; la vulnerabilidad de los diferentes recursos naturales, geológicos e hidrogeológicos, ante las actuaciones del hombre; y el riesgo del territorio a que puedan desarrollarse efectos colaterales o simultáneos con la actuación que se pretende efectuar.

En esta tesis se analiza el impacto y el riesgo ambiental de los residuos mineros y metalúrgicos existentes en la Sierra Minera, así como el efecto sobre las áreas de influencia. Para una mejor comprensión de los mismos, se ha realizado un análisis de esta problemática a nivel internacional y de los antecedentes en el área de estudio.

1.1. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS EN GENERAL

1.1.1. IMPACTO SOBRE EL MEDIO AMBIENTE DE LAS ACTIVIDADES MINERO-METALÚRGICAS

Las actividades minero-metalúrgicas generan gran cantidad de residuos (sólidos, líquidos y gaseosos) que pueden causar diferentes impactos sobre el medio ambiente y sus ecosistemas; éstos se detallan a continuación, según Rodríguez, (2002).

- a) Impacto sobre los recursos hídricos (ecosistemas acuáticos, aguas superficiales, subterráneas y marinas).
- b) Variación de la morfología del terreno.
- c) Impacto sobre el aire (atmósfera).
- d) Impacto sobre los suelos y la flora y fauna asociadas a ellos.
- e) Impacto paisajístico.
- f) Contaminación ambiental por diferentes formas de energía (ruidos o acústica, radiaciones, calor, etc.).

El poder establecer y delimitar cada uno de ellos constituye un trabajo extremadamente laborioso, pues requiere la combinación del conocimiento de un gran número de variables ambientales específicas de cada zona. Es de puntualizar que las características, propiedades y magnitud de cada una de ellas depende, en gran medida, de la vulnerabilidad y fragilidad del territorio; de la naturaleza del recurso extraído (tipo de yacimiento mineral: metálico o no metálico y la mineralización secundaria); de las rocas que lo acompañan (rocas encajantes); de la magnitud de las explotaciones (área afectada por la explotación); de los métodos de extracción, tratamiento y beneficio utilizados; condiciones hidrogeológicas e hidrológicas, de la geomorfología local y de las condiciones climáticas (condiciones geográficas locales) (Rodríguez, 2002).

Los efectos del impacto más aparentes se concentran en la zona minera donde se realizan las explotaciones, pero también pueden actuar en regiones muy alejadas del área directamente afectada. En ese aspecto, juega un gran papel el transporte por acción del viento y el ciclo hidrológico del agua.

1.1.2. IMPACTO SOBRE LAS MASAS DE AGUAS CONTINENTALES Y MARINAS

El desarrollo de cualquier actividad minera requiere el uso del agua. Esta es un elemento esencial en las actividades extractivas y de beneficio, pues se usa para disgregar, lavar, transportar sustancias y refrigerar. Esta actividad genera grandes volúmenes de aguas residuales altamente contaminadas que, en la mayoría de los casos, no reciben ningún tratamiento y cuyo vertido origina la contaminación de aguas superficiales y subterráneas. Su origen es variado y difícil de evaluar en muchos casos, debido a que estas actividades se desarrollan en condiciones geográficas muy diferentes. De acuerdo con Rodríguez Pacheco, (2002) la introducción de sustancias solubles en el medio hídrico es la forma de contaminación más importante y tiene lugar por diferentes vías:

- 1) El empleo de gran variedad de reactivos en el proceso de concentración de los minerales, entre los cuales se encuentran ácidos y bases modificadoras del pH del agua, derivados del petróleo, ácidos orgánicos, xantanos (ésteres de ácidos inestables), cianuros, etc. (Llamas, 1998).
- 2) Generación de efluentes residuales, generalmente formados por aguas ácidas ricas en metales pesados y compuestos tóxicos (principalmente plomo, mercurio, cobre, zinc, cromo, cadmio y molibdeno). Incorporación de sustancias radioactivas al agua. Las fuentes de radioactividad son los vertederos y escombreras de minas de uranio, abandonadas o en explotación (Pollock, 1986).
- 3) La introducción de sales muy solubles de diferentes tipos de sulfatos, procedentes del drenaje ácido de yacimientos de carbón, sulfuros metálicos o escombreras y minas abandonadas (fundamentalmente menas de carbón, sulfuros de Fe y de polimetálicos). La oxidación de los sulfuros se produce por entrada del oxígeno, debido a los procesos de recarga de las aguas subterráneas y a las fluctuaciones del nivel freático. Pueden existir otras sustancias capaces de provocar la acidificación de las aguas (productos químicos, orgánicos), que afectan a los ecosistemas acuáticos. Las aguas enriquecidas en sulfato hacen más solubles muchos compuestos metálicos y metales (dependiendo del pH), letales para las plantas y organismos acuáticos. El descenso del pH hace a las aguas químicamente agresivas, requiriendo una gran dilución o un tratamiento específico para que puedan utilizarse de nuevo (Elberling y Nicolson, 1996; Rodríguez y Candela, 1998; Rodríguez y Candela, 2004).

4) Sales ferrosas, que al pasar a férricas dan lugar a turbidez en el agua y a que, en lechos y márgenes de muchos ríos, se puedan observar precipitados pardos de óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso (ej. El río Tinto en España, el río Moa en Cuba), provocando una degradación casi total del medio acuático y otros problemas ambientales relacionados con la transformación de los ecosistemas naturales circundantes (Smith et al., 1998).

5) La incorporación de materia orgánica produce una disminución en la cantidad de oxígeno disuelto, y con ello se afecta el desarrollo de la vida acuática. Su origen está asociado a la deforestación de áreas tropicales durante la apertura de minas a cielo abierto, y la tala indiscriminada de los bosques existentes para crear la infraestructura necesaria (Rodríguez, 2002).

6) El aporte de diferentes nutrientes que pueden llegar a ocasionar una eutrofización (exceso de alimento para las algas y plantas en el agua) del agua, generalmente está asociado a los arrastres por erosión de las escombreras de suelo del desmonte del yacimiento y a los procesos de deforestación. También pueden incorporarse elementos metálicos que constituyen alimentos para el desarrollo de diferentes microorganismos (Brake et al., 2001). La existencia de estos nutrientes provoca también la eutrofización de las aguas, debido al desarrollo de la vegetación en el agua almacenada en las minas a cielo abierto y embalses de agua para el abastecimiento de las plantas de tratamiento y beneficio (Rodríguez, 2002).

7) Incorporación de partículas de suelos o sedimento en suspensión, particularmente cuando se desarrollan lavados de materiales aluviales para la construcción de las obras mineras y civiles, dragados de áridos aluviales y marinos, profundización de cauces fluviales, limpiezas de los puertos y canales, deforestación y almacenamiento en escombreras de suelos poco coherentes en climas tropicales de elevada pluviometría (Carménate y Riverón, 1999). En primer lugar, estas cargas sólidas que se incorporan a las corrientes de aguas superficiales producen el incremento de la turbidez del medio y la disminución de la entrada de la luz solar, provocando una disminución de la actividad biológica de plantas, animales y microorganismos acuáticos, incluyendo la fotosíntesis.

En segundo lugar, estas cargas sólidas pueden obstruir cauces y canales, provocar inundaciones, enterrar y colmatar embalses y, al llegar las aguas de los ríos a las costas, pueden producir daños a puertos, incrementar la turbidez del agua del mar, afectar el crecimiento de los corales y ocasionar su muerte por enterramiento (Martínez *et al.*, 1993; Carménate y Riverón, 1999). Pueden afectar zonas de importancia socioeconómica (de interés turístico y pesquero). Otra de las fuentes de incorporación, de partículas sólidas al medio hídrico superficial, son los vertidos de residuos en los cauces fluviales y la rotura por accidentes de las balsas de residuos o estériles (Benito, *et al.*, 2001) (ver apartado 1.1.8)

8) La oxigenación de las aguas en las plantas de lavado de áridos para la construcción (por ejemplo, a causa de agitación mecánica durante la extracción de áridos del lecho de los ríos), puede causar la destrucción de cantidades excesivas de materia orgánica, que puede resultar necesaria para el desarrollo de los diferentes ecosistemas acuáticos y de gran valor en el mantenimiento de las condiciones geoquímicas del medio (Fernández, 1998a).

9) El desarrollo de bombeos para hacer descender los niveles del agua subterránea, provoca una reducción o desaparición de las zonas húmedas o humedales, variación del caudal de los manantiales y del flujo en las aguas superficiales, por variación de los niveles piezométricos debido al bombeo de agua superficial y subterránea (Tovar, 1999).

Tabla 1.1. Relación de algunos ejemplos del impacto ambiental de las actividades minero-metalúrgicas en diferentes condiciones geográficas (modificado de Rodríguez, 2002).

País	Región	Contaminantes	Referencias
UK	Frazer's Grove	Fe, Cu, Pb, Zn	Younger, 2000
Canadá	Sudbury	Ni, Mn, Fe, SO ₄	Elberling and Nicholson, 1996
España	Galicia	Cu	Izco <i>et al.</i> , 1986, Iribar <i>et al.</i> , 1998
Portugal	Río Cabado	Zn, Cr, Pb	Goncalves, <i>et al.</i> , 1994
México	S.M. de la Paz	Ni, Cu, Mn, Fe, Zn, As	Manz and Castro, 1997
South Africa	Transval	Fe, SO ₄	Bullock and Bell, 1994
Guyana	Omai	Zn, Cu, Fe	Narayan, 1998
Brasil	Amazonas	Cr, Mn, Pb, Ni	Weissberg, 1991
Bolivia	La Paz/Oruro	Fe, Mn, Al	Pescod and Younger, 1999
Argentina		U, Ra	Bonben <i>et al.</i> , 1996
Chile	Región central	Cd, Zn	Schalscha and Ahumada, 1998
Cuba	Moa	Ni, Cr, Mn, Fe, SO ₄	Rodríguez y Candela, 1998
Cuba	Levisa	Ni, Cr, Mn, Fe,	Rodríguez y Candela, 1996

1.1.3. DRENAJES Y LIXIVIADOS DE AGUAS ÁCIDAS DE ESCOMBRERAS Y MINAS ACTIVAS E INACTIVAS

El estudio de este proceso, en las zonas afectadas por actividad minera, es muy importante y requiere un adecuado tratamiento y gestión, pues concentraciones bajas de metales pesados (del orden de ppm) son letales para los seres vivos acuáticos y constituyen un importante riesgo sanitario para el hombre y la ganadería. La toxicidad de los metales depende de su concentración, de la forma química en que se encuentre (por ejemplo, el mercurio o el plomo en compuestos orgánicos es más tóxico que en inorgánicos, mientras que con el cobre sucede lo contrario) y de la presencia de otros metales. Una sustancia química en el agua puede incrementar la toxicidad de otras; por ejemplo: la presencia de sulfato en las aguas facilita, en muchos casos, la solubilidad de otros metales, y con ello eleva el grado de contaminación (Custodio, 1983; Larsen y Postmant, 1997). Los cianuros y otros compuestos son letales, en concentraciones del orden de partes por mil, en el agua (Merian, 1991) y el ácido fluorhídrico puede dar

lugar a fluorosis en personas o animales que beban el agua enriquecida en este compuesto.

La oxidación de minerales sulfurosos tiene lugar en condiciones naturales, sin la intervención del hombre, y es la causa de que, en determinadas zonas del planeta, existan numerosos ríos con valores de pH muy bajos e incluso, con una fauna autóctona única y adaptada a esas condiciones de acidez (ej. El río Tinto en España). También es la causa de que predominen las aguas sulfatadas cálcicas sin que existan zonas de yesos (éstas son el resultado de la neutralización natural de las aguas ácidas al entrar en contacto con afloramientos de rocas carbonatadas, margas, tobas calcáreas, calizas, etc.).

La filtración a través de escombreras, se produce debido a que la acumulación de estos residuos en las balsas y presas de residuos (*tailings dams*) sobre la superficie del terreno, provoca una variación de las condiciones hidrogeológicas locales (Ribet *et al.* 1995). El agua del residuo crea un nivel freático artificial, sobre la superficie del terreno, provocando una variación de las condiciones de recarga y flujo (McWhorter y Nelson, 1979) (Figura 1.1).

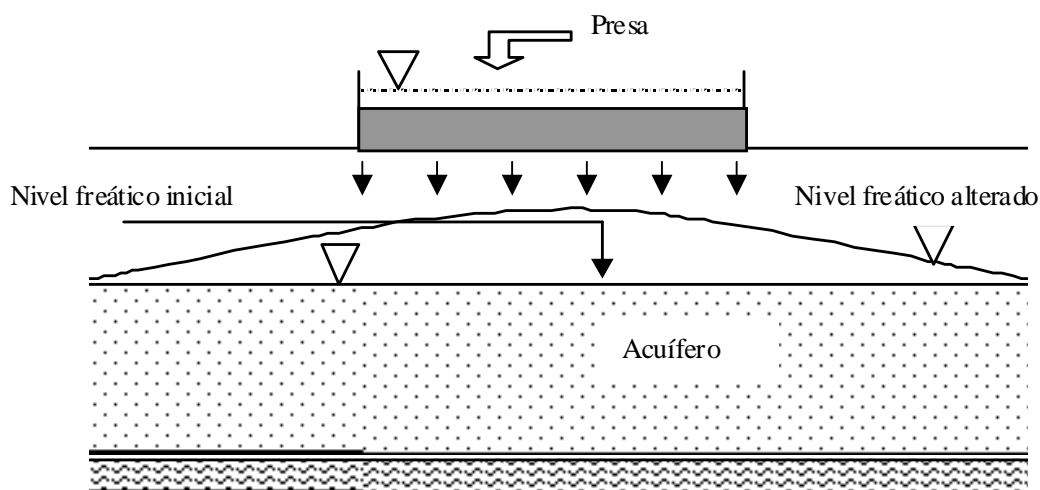


Figura 1.1. Variación del nivel freático que provoca la construcción de una escombrera sobre un acuífero libre (Rodríguez, 2002).

Por otro lado, las reacciones químicas de los diversos contaminantes que modifican el equilibrio geoquímico, pueden manifestarse en cambios de: oxidación/reducción, especiación/complejación, disolución/precipitación, adsorción/desorción, floculación y digestión de coloides (Morin y Cherry, 1988).

La generación del drenaje ácido de las minas (AMD) y escombreras está motivada por la combinación de dos factores básicos:

- I) La oxidación de los sulfuros metálicos, principalmente la pirita (FeS_2).
- II) El proceso de disolución de los sulfuros metálicos y su transporte por el agua.

Entre los sulfuros de hierro que se oxidan, la pirita ha sido la más estudiada, por su presencia en la mayoría de los depósitos minerales que se explotan en el mundo. La oxidación de la pirita da lugar a minerales secundarios: melanterita ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), romerita ($\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2 (\text{SO}_4)_4 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$), coquinbita ($\text{Fe}_2 (\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$), copiapita ($\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2 (\text{SO}_4)_6 (\text{OH})_2 \cdot 20\text{H}_2\text{O}$) y varios miembros de la familia de la jarosita, tal como la jarosita potásica ($\text{KFe}_3^{3+} (\text{OH})_6 (\text{SO}_4)_2$). Todos estos minerales están considerados como sales generadoras de acidez (Younger, 1999).

De acuerdo con Hem, (1985), existen tres tipos de acidez en las aguas: i) acidez asociada con los protones de hidrógeno (H^+), o sea el pH; ii) acidez asociada con la disolución de compuestos orgánicos y iii) acidez asociada con la disolución de metales. En el drenaje ácido de minas (AMD) la disolución de compuestos orgánicos es generalmente pequeña o nula, por lo que la acidez está asociada fundamentalmente a las causas i y iii. Sobre el tema del AMD se puede encontrar mayor información en un gran número de trabajos (Muñoz *et al.*, 1997; Younger, 1999, 2000), que tratan sobre los problemas del drenaje de aguas ácidas relacionados con la minería del carbón y polimetálicos.

El proceso de oxidación de los sulfuros está originado, de forma general, por el proceso de exposición de los minerales sulfurosos al oxígeno atmosférico. Este contacto está favorecido, en los depósitos de lodos, por el ascenso y descenso del nivel freático dentro de las balsas de residuo y del acuífero. Durante el descenso, se produce la entrada de oxígeno y la oxidación de los diferentes metales, mientras que en el ascenso, se produce la disolución y lixiviado de los diferentes contaminantes. Es bueno destacar que, la entrada del oxígeno está condicionada por el grado de saturación de los residuos y que, a partir del 80 % de saturación, se dificulta la difusión de éste en el medio (Elberling y Nicholson, 1996). La mayor o menor magnitud de este proceso depende de los intervalos de este ciclo, condicionado por la variabilidad climática, el tipo de mina y si la escombrera o balsa de residuo se encuentra en explotación o abandonada. Si está en explotación, hay un aporte de líquido del proceso metalúrgico que también juega un papel importante en el ciclo (González y Ramírez, 1995; González, *et al.*, 1995, 1997; Pluta y Trembaczowski, 2001). Es de señalar que, generalmente, por debajo de un metro de profundidad del nivel freático, en el interior de las balsas de residuos mineros ricos en sulfuros, se presenta un medio reductor, porque todo el oxígeno es consumido en la oxidación de éstos (Elberling y Nicholson, 1996).

El principal problema, del drenaje de aguas ácidas de minas abandonadas, es su caudal, debido a que al producirse su salida a la superficie, se libera un gran volumen de agua, muy rica en ácido sulfúrico, sulfatos y con gran cantidad de metales en disolución, y al drenar en tan corto espacio de tiempo, provoca la ruptura del equilibrio hidrogeoquímico natural de las aguas superficiales (Blowes *et al.*, 1992; Younger, 2000).

El efecto inicial, que provoca la salida al exterior de un gran volumen de aguas ácidas, es que el volumen de ácido sulfúrico, que generalmente las acompaña, carboniza la materia orgánica. Esto se ha podido observar claramente en la vegetación, en Aznalcollar (Quintana, 1998), especialmente en los plantones más jóvenes y en los juncos que están quemados hasta el nivel que alcanzaron las aguas (Llamas, 1998).

El pH del agua no desciende inmediatamente, ya que el agua de descarga sigue conteniendo grandes cantidades de ácido que es liberado (lavado) lentamente (Younger, 1999). En un agua estancada, como la de las balsas de lodos ricos en sulfuros, a una profundidad mayor de medio metro por debajo de la superficie, el contenido en oxígeno disuelto es prácticamente nulo (Blowes et al., 1992; Elberling y Nicolson, 1996), el ambiente es reductor y los metales se encuentran mayoritariamente estables como sulfuros. Por lo tanto, las aguas ácidas, liberadas de la balsa por los procesos de lixiviación, no pueden tener el mismo contenido en metales pesados que las aguas ácidas naturales (formadas por lixiviación de los sulfuros en un ambiente oxidante, como son las minas abandonadas). Si esas aguas infiltradas se ponen en contacto con aguas ricas en oxígeno, o circulan por la zona no saturada durante su infiltración, su capacidad para disolver metales aumenta considerablemente.

Un aspecto a tener en cuenta, en los estudios de impacto ambiental en zonas mineras, es la existencia de flujo preferente en las balsas de residuos, debido a la existencia de planos de estratificación y grietas de desecación. Estudios realizados sobre residuos mineros en el laboratorio, rebelan la existencia de flujo preferente entre uno y tres ordenes de magnitud mayor que el del medio poroso (Rodríguez, 2002).

1.1.4. VARIACIÓN DE LA MORFOLOGÍA DEL TERRENO

La morfología local sufre importantes cambios debido al movimiento de tierras, a consecuencia de la construcción de vías de acceso y cortas mineras para la extracción de la masa mineral, apertura de pozos, galerías, zanjas y excavaciones diversas. Estos grandes volúmenes de tierra o rocas, desmontes, escombreras, balsas de sedimentación y terraplenes, están sujetos a movimientos masivos y a erosión por los agentes exógenos (Vera, 1979). En general las modificaciones son más importantes si las explotaciones se hacen a cielo abierto, pero la minería subterránea también puede provocar fenómenos de subsidencia o hundimientos (Rodríguez et al., 1999; 2002b). El que se presenten unos u otros, su alcance y otros efectos, depende del tipo de roca (por ejemplo, si su deformabilidad es elevada tenderá a haber subsidencia, pero si es baja son más probables los hundimientos, que suelen causar mayores daños), de la profundidad de las labores y de su extensión, etc. Un hundimiento produce vibraciones que pueden generar graves daños también en lugares próximos, en edificios, embalses, puentes y otras obras públicas o de la propia infraestructura minera.

Las explotaciones mineras a cielo abierto tienen como característica común producir cambios en la morfología del terreno. Estos cambios son muy importantes, pues al afectar al nivel freático, provocan una interrupción del mismo y por consiguiente un drenaje artificial; en otras áreas conducen a cambios en las condiciones de flujo y recarga (Foto 1.1) (Fernández, 1981; Jiménez y Rodríguez, 1997). También se generan problemas de subsidencia del terreno debido a la extracción de aguas subterráneas, para bajar los niveles piezométricos por debajo de la profundidad de explotación de la mina.



Foto 1.1. Intersección del nivel freático con la topografía en la corta Brunita. Sierra de Cartagena-La Unión.

1.1.5. IMPACTOS SOBRE LA ATMÓSFERA Y EL SUELO

Los procesos de contaminación del aire o contaminación atmosférica, se deben a la emanación de gases a la atmósfera, la incorporación de partículas por la erosión del viento y el vertido de las chimeneas. Los residuos de bajo peso específico son los que pueden tener una mayor incidencia sobre este aspecto (cenizas de carbón, desechos de la industria petroquímica, sales resultados de los procesos de evaporación).

Los efectos de la contaminación del aire por sustancias tóxicas, pueden igualmente alcanzar elevada gravedad y suponer riesgos sanitarios importantes. Los contaminantes se originan al dividir, triturar o remover suelos, sedimentos y rocas, que luego son erosionados y transportados por las corrientes de aire. Los lugares de origen son escombreras, balsas de sedimentación, detritos de cualquier tipo, suelos con vegetación empobrecida o sin ella, vertidos o escapes de las plantas de tratamiento, talleres, ventilación, vehículos, etc. Los agentes más importantes son:

1) Aerosoles y polvo: su composición es variada y depende principalmente del material geológico que se explota (las rocas, yacimiento mineral, carbón, petróleo o gas), pero el tamaño, el volumen y otras características dependen de las técnicas mineras y metalúrgicas utilizadas y, en menor medida de otros factores, fundamentalmente del

clima local (Álvarez et al., 1982, Gregurek, et al, 1999). En el caso del polvo, presentan mayor riesgo ambiental las partículas con tamaño menor de 10 micras (Sierra et al., 1998), pues no son retenidas por las defensas del tracto respiratorio, y las menores de 2 micras son inhaladas por los seres humanos y animales, pudiendo provocar enfermedades respiratorias y cáncer de pulmón (Merian, 1991). Las partículas ricas en sílice pueden ocasionar la silicosis, sobre todo en aquellos yacimientos con explotación de volúmenes importantes de rocas ricas en sílice.

2) Los gases y compuestos gaseosos: principalmente se vierten a la atmósfera dióxidos de carbono, nitrógeno y azufre y en ocasiones sulfhídrico, fluorhídrico, etc. Las consecuencias son variadas y recaen principalmente sobre los organismos vivos de la zona minera y de sus inmediaciones, que quedan sujetos a riesgos sanitarios importantes, con variados tipos de enfermedades. Los metales pesados que acompañan estas emisiones pueden ocasionar diversas formas de toxicidad, entre las principales se encuentran la emisión de partículas ricas en cromo hexavalente. Las enfermedades de anemia y cáncer pueden ser provocadas por materiales radiactivos, y el cáncer de pulmón por asbestos, cromo, etc. (Merian, 1991; Adriano, 1995).

La sedimentación atmosférica afecta a la vegetación y a las aguas superficiales, produciendo daños diversos (Elberling y Nicholson, 1996). Las modificaciones de la morfología y la contaminación de aguas y aire, influyen negativamente sobre los suelos, que pueden ser destruidos, degradados o alcanzados por diversos contaminantes (metales pesados, compuestos tóxicos, isótopos radiactivos), por aguas ácidas, por sedimentos que los alteren, por gases nocivos, etc., con consecuencias que van desde caídas en la productividad primaria (y por lo tanto en las cosechas agrícolas), hasta la práctica desaparición de los microorganismos del suelo y de la vegetación. El principal problema ambiental, generado por los residuos gaseosos, es el origen de las lluvias ácidas, las cuales pueden manifestarse en regiones muy alejadas del área fuente de las emanaciones. El efecto que provocan estas lluvias es la acidificación de suelos y la eliminación de grandes superficies de bosques.

1.1.6. IMPACTO SOBRE EL PAISAJE

Las modificaciones morfológicas se traducen en impactos paisajísticos considerables (Ros, 1997, 1999), frecuentemente agravados por la destrucción o degradación de la vegetación, la ruina de granjas y otros edificios preexistentes, la combustión espontánea de escombreras (en el caso de la minería del carbón), la existencia de torres, barracones, plantas de concentración y tratamiento, presas de aguas y de residuos y construcciones diversas para la actividad minera (incluso poblados enteros). Por otra parte, también es cierto que la minería en ciertos casos puede aportar un valor añadido al paisaje natural, lo que se conoce como “paisaje minero”, que introduce un valor patrimonial, que es objeto de protección, y del que se hablará en el Capítulo 4.

En ocasiones, el cierre de minas subterráneas produce el colapso de la superficie del terreno, mayoritariamente por el desplome de los pilares de las cámaras, debido a la erosión hídrica de los estratos infrayacentes. Los impactos paisajísticos pueden aparecer también lejos de las operaciones (por ejemplo, daños en la vegetación a causa de las lluvias ácidas o masas de aire contaminado por el polvo de aterramiento, de actividades complementarias como la construcción de un ferrocarril, una carretera o un tendido eléctrico, etc.).

Con mayor frecuencia se realizan las explotaciones a cielo abierto, de dimensiones superiores a las subterráneas. Las causas son la creciente utilización de rocas industriales, el incremento del consumo de materia prima mineral, las leyes de contenido mínimo industrial cada vez más bajas, y los cada vez más poderosos medios tecnológicos utilizados en los procesos metalúrgicos.

1.1.7. CONTAMINACIÓN AMBIENTAL POR DIFERENTES FORMAS DE ENERGÍA

La incorporación de energía de origen antrópico al sistema, como la contaminación térmica de las aguas, debido a su uso para refrigerar, puede provocar efectos variables entre los que se encuentran los cambios de la flora y la fauna en ríos, lagos y mar, que pueden influir en el desarrollo de nuevas especies. Las oscilaciones grandes de temperatura originan contaminaciones térmicas excesivas o terminales, que pueden llegar incluso a provocar la muerte de los seres vivos acuáticos (Pollock, 1986). La emisión de gases y vapor a la atmósfera se produce generalmente con altas temperaturas (Pérez y Yuzhaninov, 1991).

La contaminación por ruido, suele ser una forma de contaminación, pues produce vibraciones de diferente naturaleza (en minería activa). Las vibraciones producidas o generadas por maquinaria pesada, explosivos, movimientos de masa de suelos y rocas pueden también dar lugar a impactos ambientales (Pollock, 1986). La contaminación ambiental por esta causa suele ser también elevada, causando diversos daños ecológicos y a la población.

Estudios de los efectos del ruido generado por las actividades minero-metalúrgicas indican que, puede provocar diferentes enfermedades sobre la capacidad auditiva de los trabajadores. Estudios en plantas metalúrgicas muestran que el 80% de los trabajadores presentan diferentes afectaciones sobre su capacidad auditiva (Aguilera, 1998).

1.1.8. RIESGO AMBIENTAL POR ROTURA O FALLO MECÁNICO DE LAS PRESAS DE RESIDUOS

Los residuos almacenados, ante la posibilidad de fallo o rotura de las presas y balsas de lodos, es una de las mayores causas de riesgo que hay que considerar, por su posible impacto ambiental. La rotura por pérdida de la estabilidad es la causa mas frecuente. Los factores que tienen un efecto directo sobre la estabilidad de los diques de estériles, y por tanto en sus capacidades de retención a largo plazo, tienen que ver con la presencia del agua y su manipulación de una forma u otra. Una relación de casos, de las principales causas y de los daños que provocan el fallo o rotura de las presas de lodos o residuos mineros y metalúrgicos se pueden consultar en la página:

<http://www.antena.nl/wise/uranium/mdap.htm/>.

Uno de los procesos más observados, en el fallo de las presas de residuos o de las balsas de lodos, es el debido a las filtraciones a través del muro, erosión interna, inundación, desbordamiento por coronamiento y por fallo de la cimentación; situaciones que pueden empeorar debido a fenómenos naturales como movimientos de tierras o fuertes lluvias. El agua contenida dentro del dique y la depositada detrás de él encontrarán un nivel natural (nivel freático), que puede variar dependiendo de las estaciones, el volumen de los estériles vertidos y otros factores. Si el nivel freático intercepta la cara externa del dique (aguas abajo), se desarrollará una superficie de rezume que pueda provocar una rápida erosión y el deslizamiento eventual de esa cara o muro.

En varias ocasiones, algunos fallos en diques se han atribuido a que se han bloqueado o dañado tuberías de decantación y drenaje, aumentando el valor de la presión intersticial del material del dique y disminuyendo su resistencia al deslizamiento.

La rotura o riesgo de rotura del dique por erosión, es importante y típico en aquellas zonas tropicales y subtropicales que presentan una elevada pluviosidad. Según Bligh, (1994), los ángulos de talud, para los que el riesgo por erosión es máximo, están comprendido entre 25-35 grados (Figura 1.2).

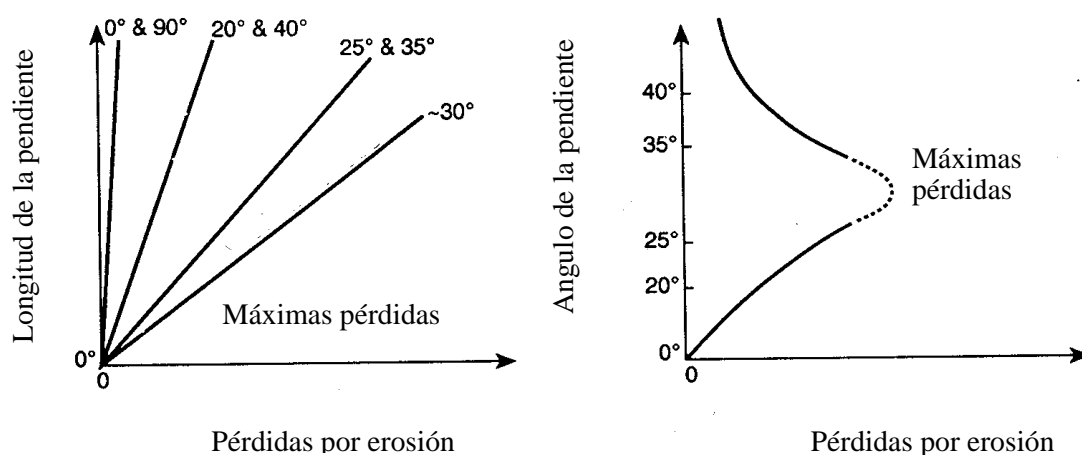


Figura 1.2. Pendientes para las que ocurre la mayor erosión por el agua y el viento en los taludes de las presas de residuos y estériles (adaptado de Bligh, 1994).

Las ondas generadas por movimientos de tierras (sismos y grandes deslizamientos,) pueden tener consecuencias devastadoras para los materiales, relativamente no consolidados, del muro del dique que retiene los lodos mineros. Por ejemplo: un movimiento sísmico en el año 1965 en Chile, produjo la rotura de 15 presas y murieron 210 personas (Troncoso, 1988).

El fallo por licuefacción es importante en aquellas explotaciones mineras, con balsas de estériles y lodos, ubicadas en zonas del planeta sísmicamente activas. Las más favorables a licuefactar son aquellas que presentan una granulometría areno-limosa (Committee on Earthquake Engineering, 1985; Yasuhara et al., 1994) (Figura 1.3). Los fallos se producen, generalmente, al recrecer excesivamente balsas muy antiguas, cuyos problemas de cimentación y estabilidad se han olvidado a lo largo de una dilatada explotación minera.

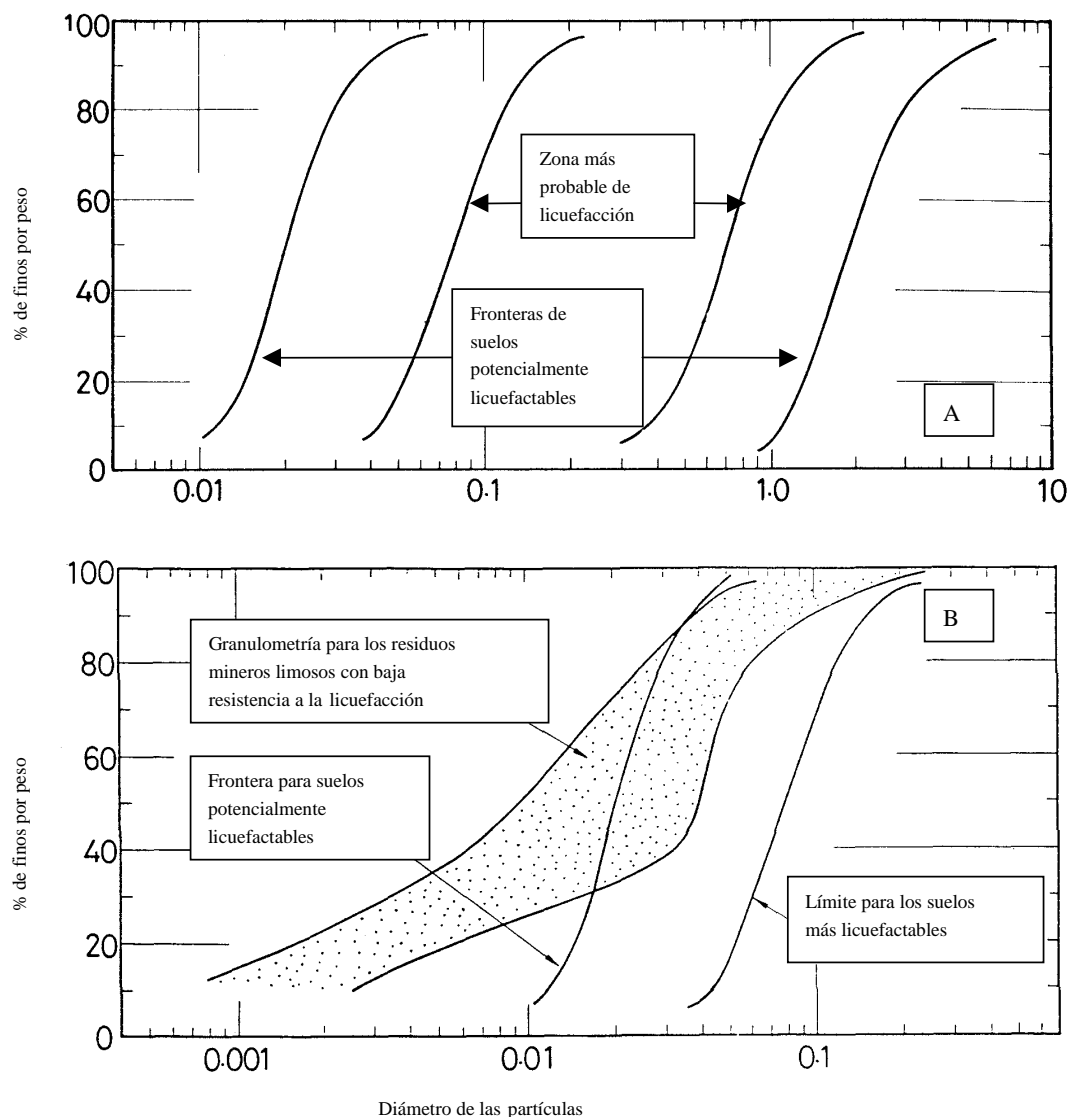


Figura 1.3. A) Rangos de granulometría en los que pueden desarrollarse los procesos de licuefacción. B) Rangos para residuos mineros que por el tamaño de sus partículas se clasifican como limos (Committee on Earthquake Engineering, 1985).

En un extenso trabajo realizado por el Mining Journal Research Services se llevó a cabo la inspección de diques de estériles en países de economía de mercado, con un volumen de producción en cobre del 75% del total mundial y del 60% de plomo y zinc. También investigó aquellos países con aproximadamente el 65% de producción global de oro. Se ha estimado que la cantidad de diques en África del Sur es del orden de 400, mientras que British Columbia y Québec poseen probablemente unos 300. Por tanto, es razonable suponer que, a nivel mundial, el número de presas pueda contarse por miles.

Como principal resultado, el Mining Journal Research Services (MJRS, 1999), revisó la frecuencia de los fallos o roturas de las presas o depósitos de lodos en el período 1980-96, para el Programa Medioambiental de las Naciones Unidas (UNEP). El estudio identificó un número importante de incidentes, desde pequeñas cantidades de agua sucia y emisiones de polvo desde las superficies secas de los diques, hasta un desplome total.

En Internet (<http://www.antena.nl/wise/uranium/mdap.htm/>) pueden encontrarse un resumen de 78 roturas de diques, desde 1961 hasta octubre del 2000. Los incidentes a gran escala resultaron ser poco frecuentes al identificar solo 8 grandes fallos, donde el volumen de residuo y agua vertido supera los 1000 m³.

El hecho de que se produzca la rotura de las balsas o presas de lodos, y de que el lodo y aguas contaminadas existentes salgan al exterior, tiene consecuencias medioambientales catastróficas (desarrollo de procesos físicos y químicos), debido a que la fracción sólida presenta una elevada superficie específica (superficie por unidad de peso) (Rodríguez, 2002). Entre las consecuencias ambientales se citan las siguientes:

- Las partículas sólidas pueden comportarse como un fluido (con muy poco rozamiento entre ellas), cuando el contenido en agua es suficientemente elevado.
- Los lodos tienen una gran capacidad para cubrir drenajes, tapar tuberías, etc., debido a su pequeño diámetro, generalmente menor de 0.5 mm (Tabla 1.2).
- La fina granulometría de los lodos facilita que se puedan poner en suspensión y removilizar en el agua (más difícilmente por el aire, debido a que generalmente las partículas presentan un peso específico elevado).

Tabla 1.2. Características físicas de residuos minero-metalúrgicos almacenados en presas y escombreras (*tailing dam*). Valores medios indicativos (Rodríguez, 2002).

Mineral extraído	Localidad - País	ρ_a g/cm ³	ρ_s g/cm ³	Ll	Lp	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Referencia
Ni y Co	Moa ACL - Cuba	1.8	3.97	43.9	39.9	10	70	20	Rodríguez, et al 1998
Ni y Co	Moa SAL-Cuba	1.8	3.91	25	24	14	70	16	Heredia 1980
Ni y Co	Mayarí ACL-Cuba	1.4	3.81	40	36				Heredia 1980
Fe	Hamersley -Australia		3.5	30	39	42	54	4	Swarbrick, et al., 1992
Fe	Newman-Australia		3.7	33	44	29	58	13	Swarbrick, et al., 1992
C	Riverside-Australia		1.74	44	56	39	49	12	Swarbrick, et al., 1992
C	Wambo-Australia		1.86	74	116	57	35	8	Swarbrick, et al., 1992
Al	Weipa-Australia		2.85	43	60	32	40	28	Swarbrick, et al, 1992
Fe	Fernandinho-Brasil		3.6			8	70	22	Tibana and Campos 1998
Cu, S, Zn	Aznalcollar-España								
	Estéril		3.1	NP	NP	1.0	96.6	2.4	López, 1999
	Lodos		4.5	NP	NP		98	2.0	Lloret et al., 1999

ps: densidad de las partículas sólidas, ρ_a : densidad seca, Ll: límite líquido, Lp: límite plástico, NP: no plástico. Estéril: no pasa por el proceso metalúrgico. Lodo: pasa por el proceso metalúrgico.

- Entre las consecuencias químicas, cabe destacar su mayor velocidad de reacción en el medio ambiente, pues la superficie específica de las partículas (S_e) es mayor que en la roca natural de origen. Los minerales sulfurados que componen la mayor parte del material (FeS₂, FeAsS, ZnS, PbS, CuS, etc.) se oxidan en contacto con el oxígeno de la atmósfera y esta reacción es catalizada por algunas bacterias, como la *Thiobacillus ferrooxidans*, *Eschenschia mutabilis* (Brake, et al, 2001), comunes en todos los suelos. El resultado de esta oxidación es el paso del sulfuro a sulfato; es decir, la formación de

ácido sulfúrico (aproximadamente 1,5 g por cada gramo de pirita), que da lugar a las aguas ácidas.

Este ácido, al disminuir el pH del agua, y al estar el medio en condiciones oxidantes (en contacto con el aire), tiene una gran capacidad para disolver los metales. Por lo tanto, cabe considerar la posibilidad de que todos los metales presentes en los lodos mineros, al producirse la rotura de las balsas, se movilicen y terminen incorporándose al suelo, corrientes de aguas superficiales y aguas subterráneas, contaminándolos de tal forma que, posiblemente, su recuperación resulte económicamente inviable (MJRS, 1999).

Al producirse la rotura de un dique, el volumen de residuo se extiende por una gran superficie, por lo que la masa de sulfuro puesta en contacto con el oxígeno, es varias veces mayor que la que se encuentra en contacto en el interior de la balsa. La oxidación de los minerales sulfurosos (pirita fundamentalmente) es un proceso fuertemente exotérmico y, si el espesor de la capa de lodos, extendida sobre la superficie debido al vertido por rotura de las balsas, es lo suficientemente grande como para disipar mal el calor, una ligera humedad causada por la lluvia, unida a las altas temperaturas, pueden dar lugar a la autocombustión de los residuos, con riesgo de incendios. Este riesgo no es muy importante, pero hay que considerarlo, fundamentalmente para aquellas áreas del planeta con altas temperaturas y poca precipitación, donde normalmente el nivel de humedad de los lodos llega a ser muy bajo.

1.1.9. IMPACTO AMBIENTAL Y RIESGO DE LOS PROCESOS DE EROSIÓN

Los estudios de erosión en zonas de actividad minera intensiva, revelan el impacto ambiental que producen los procesos erosivos producto de la escorrentía superficial, los cuales producen la concentración de las aguas meteóricas en la superficie de los depósitos. En la Figura 1.2 se puede apreciar la longitud y ángulo de las pendientes de balsas de lodos para las que se producen las mayores tasas de erosión.

1.2. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO

La Sierra de Cartagena-La Unión o Sierra Minera, constituye uno de los distritos mineros más importantes en España, y el de mayor relevancia en la Región de Murcia, por sus yacimientos de Fe-Pb-Zn.

En los aproximadamente 50 km² que ocupa el área central de la Sierra Minera, se encuentran numerosos testimonios de su prolongada actividad, tales como galerías romanas, pozos, castilletes, chimeneas, hornos de fundición, cortas mineras, etc. Las labores se iniciaron al final del siglo III a.J.C. (Orejas y Antolinos, 2001) en la época de los cartagineses y romanos; en los siglos XIX y XX tuvieron su mayor apogeo,

desarrollado en dos etapas: una entre los años 1842 y 1950 y otra desde 1950 hasta su paralización en el año 1991.

Con tan dilatada historia minera, el área de estudio ha sido ampliamente estudiada desde el punto de vista geológico y mineralógico. Así, Friedrich, (1962, 1964); Graeser y Friedrich, (1970); Espinosa et al., (1974); Oen et al., (1975a y b); Arribas, (1980); Arribas et al., (1995); proponen una única etapa de mineralización durante el Terciario. Por el contrario, Urban, (1968); Pavillon, (1969, 1972); Alabert, (1973); Ovejero et al., (1976); Ovejero (1980); Manteca y Ovejero, (1992) proponen un proceso metalogenético que se habría llevado a cabo en varias etapas y con removilización de mineralizaciones preexistentes triásicas y/o paleozoicas.

Oen et al., (1975) proponen tres zonaciones: una zona central, con mineralizaciones de sulfuros, carbonatos, sílice y óxidos e hidróxidos, relacionadas con las rocas volcánicas tardías (Cabezo Rajao, Las Lajas, San Luís, Pablo y Virginia, etc.); una zona intermedia, con mineralizaciones de sulfuros, carbonatos, sílice, greenalita y magnetita (cortas Emilia, Tomasa, San Valentín, San José, Gloria, Brunita) y una zona externa caracterizada por paragénesis de sulfuros, carbonatos y sílice en rellenos filonianos que encajan en mármoles y esquistos nevado filábrides, en calizas alpujárrides y en sedimentos miocenos. Kager, (1980); Lunar et al., (1982); López y Lunar, 1983; López García, (1985); Manteca y Ovejero, (1992) clasifican los yacimientos minerales según sus características morfológicas y genéticas en seis tipos: mantos, disseminaciones en el Mioceno, estructuras filonianas, stockworks, filones y reticulaciones y depósitos tipo gossan. En este trabajo se definen las diferentes unidades geológicas presentes en el área de estudio y sus depósitos minerales. Arribas y Arribas, (1995) estudian las características metalogenéticas y geoquímicas de los yacimientos metálicos del Sureste de España entre los que se incluyen los de la Sierra Minera.

La tectónica y sismotectónica ha sido analizada por ITGE, (1994d); Rodríguez Estrella et al., (2000c, 2002b). En ella se concluye que la zona presenta cierta actividad sísmica y con riesgo, determinado por la probabilidad de ocurrencia de un terremoto con magnitudes comprendidas entre 2 y 5 según la escala de Richter.

El estudio de la red hidrográfica ha sido realizado por Conesa, (1989, 1990). En ellos se analizan todos los parámetros físicos de las diferentes ramblas que discurren por el Campo de Cartagena y las de la Sierra de Cartagena-La Unión.

En el área de estudio se han desarrollado diferentes trabajos donde se evalúa la contaminación producida por las actividades minero-metalúrgicas. Para una mejor comprensión de la misma se analizan a continuación los trabajos más significativos.

La presencia de metales en la laguna del Mar Menor ha sido objeto de estudio por Simonneau, (1973); De León et al., (1982); Díaz del Río, (1993). En todos estos trabajos se concluye que la concentración de los metales Pb, Zn, Cu, Mn, Fe es elevada.

En ninguno de los casos se establece una relación cuantitativa entre esta contaminación, los residuos y el medio geológico existentes en la zona; solo se hace mención a que se debe a la actividad minera desarrollada en la Sierra de Cartagena-La Unión.

En el caso de la Bahía de Portman los valores de los contaminantes se atribuyen al vertido de lodos directamente al Mar Mediterráneo (Martínez et al., 1993), sin considerar que durante toda la época en que se ha prolongado la actividad minera y metalúrgica, las ramblas fueron usadas como medio de vertido de los residuos generados, llegando a producir su colmatación (Vilar et al., 1991).

La hidrogeología de la Sierra Minera está muy poco estudiada. Desde el punto de vista hidroquímico, el grado de conocimiento de la contaminación de las aguas subterráneas es también escaso. En la zona se han desarrollado diferentes estudios de carácter local, tales como CEBAS, (1970) que realiza un estudio hidrogeológico en los alrededores de Escombreras-Cartagena, y llega a las siguientes conclusiones: - las aguas del acuífero del Trias son las de mejor calidad, - los pozos próximos a la costa presentan intrusión marina y - las aguas del Paleozoico son de mala calidad para uso agrícola.

La Sociedad Minero Metalúrgica de Peñarroya España, S.A. (SMMPE) realizó un estudio hidrogeológico en el sector sur de la Sierra de Cartagena-La Unión (Carulla, 1977b), con el objetivo de buscar agua para abastecer al lavadero de mineral. En sus conclusiones destaca la presencia de tres materiales acuíferos distintos: - el más superficial, de naturaleza aluvial y de mala calidad; - el carbonatado de la unidad Alpujarride de Portmán; - el profundo constituido por los mármoles permotriásicos de la unidad Nevado Filábride. Además, los materiales acuíferos están totalmente compartimentados, lo que se demuestra mediante sus diferentes piezometrías y diferenciación por las propiedades físico-químicas.

Posteriormente, García et al., (1978) realizan un estudio hidrogeológico en el sector comprendido del Descargador al Llano del Beal (Cartagena), para la misma empresa, con el objetivo de buscar caudales para abastecimiento de la mina. Ponen de manifiesto que en esta zona hay un descenso importante de los niveles piezométricos, y que existe una compartimentación en bloques, diferenciados tanto por la piezometría como por la hidroquímica.

La Confederación Hidrográfica del Segura C.H.S., (1991) realiza un estudio hidroquímico para establecer la influencia del vertido de lodos de flotación, provenientes del lavadero Roberto-II, al vaso de la corta Tomasa, en la zona

comprendida entre el Llano del Beal y Portmán. En este informe se llega a la conclusión de que existe una infiltración, del agua marina que aportan los lodos, al acuífero. Se demuestra porque, en los pozos analizados, el agua ha pasado de sulfatada magnésica a clorurada sódica; por un aumento de la conductividad y por la concentración de sustancias tóxicas como arsénico, boro y cromo. Esta agua contaminada ha surgido por manantiales, dando lugar al desarrollo de fuentes de aguas intermitentes.

El estudio más amplio es el desarrollado por el MOPTMA, (1996a), donde se analiza el sector central de la Sierra Minera. Como conclusión fundamental de estos trabajos, se puede señalar que las aguas están muy salinizadas y que no se define con certeza un modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico, para la unidad hidrogeológica de la Sierra de Cartagena-La Unión.

En el Estudio hidrogeológico Campo de Golf (Atamaría-Cartagena), (Rodríguez et al., 2000a), realizado en el valle limitado por la sierra costera y la Sierra Minera, en el paraje Atamaría (Los Belones-Cartagena), se pone de manifiesto que: - la complicación tectónica debe facilitar la conexión hidráulica en profundidad; - se distinguen bloques hidrogeológicos por sus diferencias piezométricas; - la calidad química de las aguas es mala, con una salinidad comprendida entre 2 y 2,5 g/L.

El acuífero de Escombreras, con una extensión de 44 km², ha sido estudiado por Rodríguez Estrella, (1997) y Rodríguez et al., (1997). Las conclusiones más importantes de su estudio son las siguientes: - la cota del nivel piezométrico oscila entre los 36 m s.n.m. en la parte más alta del valle del Gorguel, y 0 m en el Fangal; - existe un flujo hidráulico subterráneo hacia el SO, que concluye con la salida al Mar Mediterráneo; - el gradiente es variable, siendo de 1% en las zonas más elevadas, y disminuye al 0,5% al llegar al Valle de Escombreras, hasta el punto que existen zonas que en ocasiones la circulación subterránea y superficial es nula o incluso centrípeta, como ocurre en el paraje El Charco; - existe una alimentación de los afloramientos carbonatados del Cerro de la Campana y Cabezo de la Porpuz al aluvial del valle principal, constituyendo el barranco de Escombreras un eje de drenaje.

En cuanto a los residuos presentes en el área, hay que señalar que el Ministerio de Industria ha realizado varios inventarios de balsas IGME, (1974b, 1986a); ENADIMSA, (1988b); ITGE, (1999a). En estos trabajos se han identificado diferentes estructuras mineras, inventariándolas en fichas, utilizando para ello hasta 80 códigos diferentes. La información se centra en describir, de forma muy sintética, las características de las diferentes balsas de lodos.

En relación con la caracterización físico mecánica de los lodos de flotación, hay que señalar el trabajo del MOPTMA, (1996b) realizado en la cuenca visual de la Bahía de

Portmán. En éste se analizan los lodos acumulados en varias balsas depositadas en tierra y los vertidos en la Bahía dentro y fuera del mar. Como principal resultado se obtiene que son materiales limosos, con un gran ángulo de fricción interna (30°-40°), y una cohesión muy baja o nula.

La caracterización de la composición química de los residuos y algunos materiales geológicos ha sido realizada por Solano, (1990). En su trabajo analiza 29 muestras, a las cuales se determinó la composición mineralógica y química en óxidos de 9 elementos. En el trabajo solo se valora la posibilidad de su aprovechamiento industrial para la obtención de aluminio. En ningún momento se hace referencia al impacto o riesgo ambiental de estos residuos o materiales estériles. El principal resultado es que solo dos de las muestras estudiadas reúnen las propiedades físico-químicas para ser utilizadas en la obtención de aluminio.

El riesgo de hundimiento en áreas mineras de la Sierra de Cartagena-La Unión, ha sido estudiado por Manteca et al., (1999), en una zona de 96000 m² al Oeste del Cabezo Rajao (La Unión). En el se pone de manifiesto: - el volumen de huecos alcanza un valor medio del 68%; - la zona se encuentra en la intersección de los dos sistemas de fallas regionales, N70E y N130E; - el limite nor-oriental del hundimiento está limitado por la falla Las Lajas-La Cierva del sistema N130E; - dicha falla es un accidente sismotectónico de 3^{er} orden; - coincidencia temporal del sismo de magnitud 2,3; - la subsidencia ha alcanzado un valor máximo de 507 mm; - el volumen de subsidencia aproximado es de 21000 m³.

1.3. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

1.3.1. MOTIVACIÓN

La Sierra de Cartagena-La Unión (Figura 1.4) constituye uno de los distritos mineros más grandes y antiguos de Europa, con una extensión aproximada de 100 km². Las explotaciones mineras de esta zona datan, al menos, de tiempos pre-romanos y finalizaron en el siglo pasado, en el año 1991.

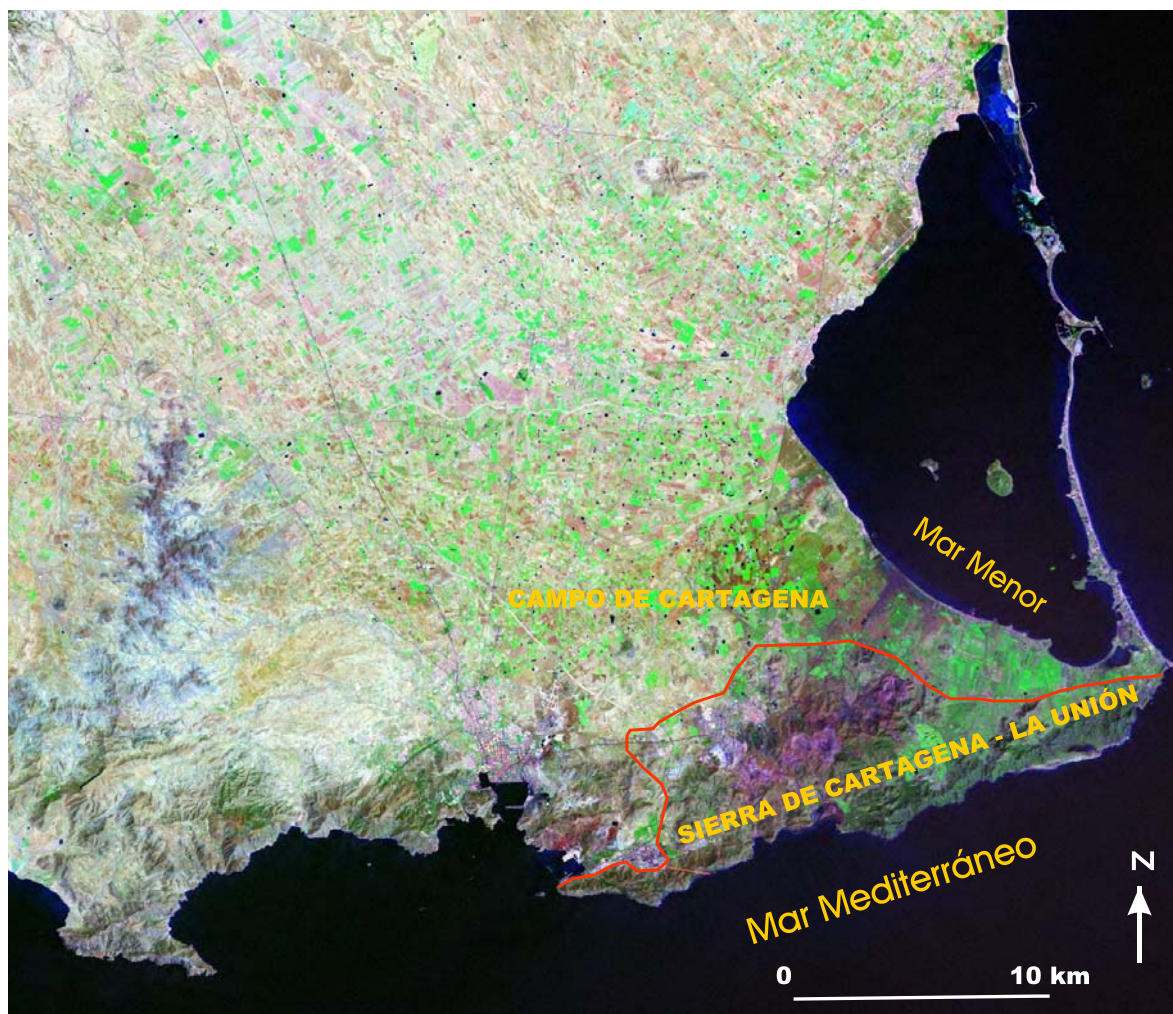


Figura 1.4. Foto satélite del área comprendida por la Sierra de Cartagena-La Unión.

Durante los diferentes periodos de explotación de estas minas, se produjeron más de 3,5 millones de toneladas de concentrados (Galena, Blenda y Pirita). En la zona se encuentran ubicadas 89 balsas de lodos derivadas del proceso mineralúrgico de concentración, en las cuales se almacenan unos 23 millones de m³ y otras 358 escombreras de materiales estériles, en las que hay depositados del orden de 151 millones de m³. No se ha encontrado una solución global para tal volumen de materiales. Se están aprovechando pequeños volúmenes de rocas de las escombreras situadas en las proximidades de las cortas, como relleno para carreteras y en la creación de puertos deportivos a lo largo de la costa más próxima. En ambos casos no se han aplicado ningún tipo de medidas correctoras o métodos de tratamiento o regeneración ambiental.

Conjuntamente con las actividades mineras, en el área de estudio y su radio de influencia, se conjuga su gran valor medioambiental, al encontrarse, dentro de la Sierra de Cartagena-La Unión, el parque regional de Calblanque, Monte de las Cenizas y Peña del Águila (decreto 45/1995). En su área de influencia hay declarados Lugares de Importancia Comunitaria (LIC); Zonas de Especial Protección Para las Aves (ZEPAS);

Zonas Especialmente Protegidas de Importancia para el Mediterráneo (ZEPIM), y diferentes Lugares de Importancia por su vegetación, Patrimonio Geológico, Minero y Arqueológico (ver Capítulo 2).

Considerando el volumen de residuos y estériles almacenados, la dimensión de las cortas mineras en la Sierra de Cartagena-La Unión, la tradición histórica de la actividad minera de esta zona y la existencia de diferentes afecciones al medio ambiente, se estima conveniente y oportuno trabajar en ella, con el objetivo de delimitar las áreas de impacto y riesgo ambiental. Para ello es necesario definir un objetivo general concreto y una serie de objetivos específicos que se detallan a continuación.

1.3.2. OBJETIVOS

1.3.2.1. Objetivo general

El objetivo general de esta tesis consiste en **evaluar el impacto y riesgo ambiental de los residuos minero-metalúrgicos existentes en la Sierra de Cartagena-La Unión sobre el medio natural**. Esto incluye evaluar el efecto producido sobre la atmósfera, el suelo, la flora y la fauna asociada, los recursos hídricos y los ecosistemas acuáticos y terrestres de la Sierra Minera y su radio de influencia.

1.3.2.2. Objetivos particulares

1. Realizar la caracterización del área de estudio teniendo en cuenta las diferentes variables que definen el medio físico: climáticas, geológicas, hidrogeológicas, económicas y sociales que interactúan en el área de trabajo y su radio de influencia.
2. Realización del inventario de todas las estructuras mineras de la Sierra, donde se incluyen las balsas de lodos, las escombreras de diferentes tipos de materiales estériles, los pozos mineros, las cortas y los restos arqueo-industriales, y establecer dentro de sus características y propiedades los parámetros necesarios a considerar para delimitar su impacto y riesgo ambiental. Para ello se aplican las metodologías más adecuadas o se desarrollan en su caso las no existentes, o se modifican las ya conocidas.
3. Realizar la clasificación de las diferentes balsas de residuos minero-metalúrgicos y las escombreras de estériles existentes en Sierra de Cartagena-La Unión, de acuerdo a su origen, características físico-mecánicas, composición mineralógica y química.
4. Realizar el inventario de puntos de agua y su muestreo para delimitar el impacto sobre el medio hídrico superficial y subterráneo.

5. Establecer el grado de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas provocado por los residuos minero-metalúrgicos.
6. Establecer las características hidroquímicas de la unidad hidrogeológica de la Sierra Minera.
7. Delimitar las áreas de mayor impacto y riesgo ambiental de la Sierra Minera y su radio de influencia.
8. Proponer y fundamentar, en función de los resultados, las medidas correctoras para corregir el impacto y riesgo ambiental en la Sierra de Cartagena-La Unión.

1.4. TRABAJOS REALIZADOS

Para cumplimentar los objetivos planteados ha sido necesario realizar las siguientes actividades:

- * Estudio bibliográfico sobre las diferentes metodologías, normas y trabajos de evaluación de impacto y riesgo ambiental de los residuos minero-metalúrgicos (a nivel internacional, normativas de la Comunidad Europea, EUA-EPA, Canadá, Japón, etc.). En este caso, es necesario hacer hincapié en los aspectos que se consideran para determinar si una escombrera de estériles, balsa y presa de residuos minero-metalúrgico, representa o no un riesgo ambiental para el medio ambiente y sus ecosistemas.
- * Recopilación, análisis y síntesis de la información existente sobre características, físicas, geoquímicas, geológicas e hidrogeológicas del área de estudio, así como los trabajos previos sobre el impacto de los residuos minero-metalúrgicos.
- * Mapas de los recursos naturales existentes en la Sierra de Cartagena-La Unión (mapas de los yacimientos minerales metálicos y no metálicos (materiales de construcción), aguas superficiales y aguas subterráneas).
- * Mapas de las cuencas hidrográficas de las diferentes ramblas.
- * Mapas hidrogeológicos (de puntos de agua, piezométrico). Para la confección se ha de realizar el inventario de puntos de agua (pozos, manantiales, drenajes de escombreras, pozos mineros) y su ficha correspondiente (pozos secos y pozos con agua), donde quede delimitada la ubicación y el nivel de las aguas subterráneas. Para la realización de la caracterización de los acuíferos y la calidad de los recursos hídricos es necesario realizar el muestreo de las aguas superficiales, subterráneas (pozos acuíferos y manantiales), zonas de lixiviado de las escombreras y cortas mineras.

* Inventario y cartografía de las cortas mineras (características de las mismas, profundidad, si intercepta o no el manto freático (distancia al manto freático, calidad química del agua, etc.).

* Inventario de las minas subterráneas y galerías mineras de explotación existentes en el área (minas socavones, etc.), siempre que sea viable.

* Inventario y cartografía de las balsas de lodo y de las escombreras de estériles (delimitación de sus principales características, tales como si presenta muro de contención, hay algún deslizamiento o fisura en la balsa, dimensiones área, altura, volumen de residuo almacenados, características del material, si presentan drenaje de aguas, si aparece vegetación en la superficie).

* Caracterización y clasificación de los diferentes tipos de residuos de acuerdo al tipo de tratamiento mineralúrgico (si es de flotación, de triturado o machaqueo, o combinación de ambos), si tiene muro de contención a no, si esta impermeabilizada o no, presencia de erosión en el muro, si el material es consolidado o no, características estratigráficas, etc.

* Confección de un mapa donde queden delimitadas las áreas de impacto y riesgo ambiental, considerando: los parámetros geológicos (composición mineralógica, química y características geoquímicas), factor climático (precipitación, viento), características físico-mecánicas de los diferentes materiales (granulometría, propiedades de licuefacción, estabilidad de los muros de contención de las presas (por erosión del talud o por falla de este, delimitar las zonas de deslizamiento), características hidrogeológicas (permeabilidad de los materiales, cercanía al nivel freático, existencia o no de drenaje a las corrientes de aguas superficiales, calidad química de las aguas de drenaje, etc.).

1.5. METODOLOGÍA DEL TRABAJO

La metodología del trabajo realizado se esquematiza en la Figura 1.5 y en el Capítulo 3 se especifica de manera concreta los diferentes materiales y métodos empleados en el mismo.

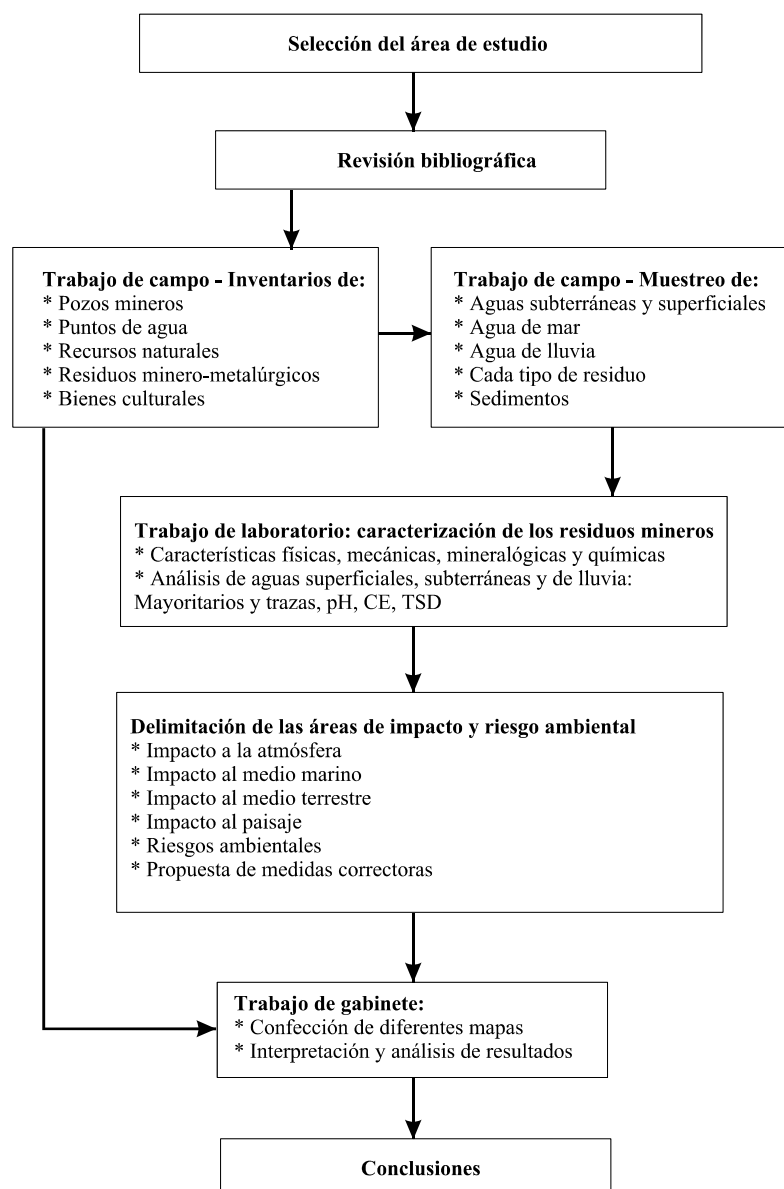


Figura 1. 5. Diagrama de flujo de la metodología de trabajo.

1.6. NORMATIVAS

Aunque el objetivo de este trabajo es la evaluación del impacto y riesgo ambiental de los residuos de la Sierra Minera y su radio de influencia, a continuación se definen las principales directivas existentes, dentro del marco de la Unión Europea, para la realización de los estudios de evaluación de impacto ambiental (E.I.A.).

1.6.1. DIRECTIVAS

El Consejo de la Comunidad Económica Europea ha regulado, en la Directiva 85/337/CEE, la forma y amplitud con que han de realizarse los estudios de evaluación de impacto ambiental de ciertas obras públicas y privadas. La incorporación al ordenamiento interno español de la citada Directiva se ha producido mediante el Real

Decreto Legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de Evaluación de Impacto Ambiental, que establece la obligación de someter a evaluación de impacto, los proyectos que en el mismo se relacionan en el anexo, mediante la realización de un estudio con el contenido que se señala, y con la obligación de ser sometido a información pública y demás informes que se establezcan.

La Constitución Española, en su artículo 45, impone a lo poderes públicos la defensa del medio ambiente, y en su artículo 9 les exige asimismo que faciliten y posibiliten la participación de todos los ciudadanos en la vida económica, cultural y social; este doble mandato constitucional implica, en la línea expuesta por la Comunidad, que en materia de medio ambiente, se ha de prevenir como mejor defensa, y los sistemas de prevención han de ser elaborados sobre la base de una amplia participación.

Teniendo presentes los principios comunitarios, junto al espíritu recogido en la Constitución; en cumplimiento de lo ordenado en la misma y, en uso de la facultad concedida por el citado R.D.L. 1302/1986, se dictó el R.D. 1131/1988, de 30 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento para la ejecución del Real Decreto Legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de Evaluación de Impacto Ambiental (BOE nº 239, de 5-10-88).

La Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) constituye una técnica cuya operatividad y validez como instrumento para la preservación de los recursos naturales y defensa del medio ambiente está recomendada por Organismos Internacionales tales como UNESCO, EPA y U.E. Su aplicación viene avalada por la experiencia acumulada en países desarrollados (EUA, Canadá, Francia, Países Bajos), que la han aplicado e incorporado a su ordenamiento jurídico desde hace varias décadas, al que se ha adherido España desde la promulgación de los referidos reales decretos.

La técnica de EIA es preventiva al objeto de evitar en los orígenes las perturbaciones y contaminaciones que puedan derivarse del ejercicio de ciertas actividades, más que combatir los efectos negativos que producen.

En el art.10 del R.D. 1131/1988 se hace referencia a la identificación y valoración de los efectos e impactos notables previsible de las actividades proyectadas sobre los aspectos ambientales.

Se jerarquizarán los impactos ambientales identificados y valorados, para conocer su importancia relativa. Asimismo, se efectuará una evaluación global que permita adquirir una visión integrada y sintética de la incidencia ambiental del proyecto.

En el caso concreto de la zona de estudio, se van a identificar y caracterizar los efectos que se han producido y se siguen produciendo, debidos principalmente a la acumulación

de los residuos mineros y metalúrgicos generados a lo largo de la historia minera de la Sierra de Cartagena-La Unión, pues durante todo este periodo no existía una normativa de evaluación de impacto ambiental a nivel nacional, que controlara el desarrollo de estas actividades. No obstante, en la vigente Ley de Minas de 22/1973 y en el Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera R.D. 2857/1978), en los títulos III, IV y V de este último, donde se regulan los aprovechamientos de recursos de las distintas secciones, en el otorgamiento de las autorizaciones correspondientes, dice que se otorgan, y entre otros datos hace constar “*las condiciones especiales que se consideren convenientes y, entre ellas, las adecuadas a la protección del medio ambiente*”. Parece evidente que las empresas no han respetado dichas condiciones, ni la administración las ha exigido.

Principales conceptos definidos en el R.D. 1131/1988

Estudio de impacto ambiental.- Es el documento técnico que debe presentar el titular del proyecto y sobre la base del que se produce la Declaración de Impacto Ambiental. Este estudio deberá identificar, describir y valorar de manera apropiada, en función de las particularidades de cada caso concreto, los efectos notables previsibles que la realización del proyecto produciría sobre los distintos aspectos ambientales (efectos directos e indirectos; simples, acumulativos o sinérgicos; a corto, a medio o a largo plazo; positivos o negativos; permanentes o temporales; reversibles o irreversibles; recuperables o irrecuperables; periódicos o de aparición irregular, continuos o discontinuos).

Efecto notable.- Aquel que se manifiesta como una modificación del medio ambiente, de los recursos naturales, o de sus procesos fundamentales de funcionamiento, que produzca o pueda producir en el futuro repercusiones apreciables en los mismos; se excluyen por tanto los efectos mínimos.

Efecto mínimo.- Aquel que puede demostrarse que no es notable.

Efecto positivo.- Aquel admitido como tal, tanto por la comunidad técnica y científica como por la población en general, en el contexto de un análisis completo de los costes y beneficios genéricos y de las externalidades de la actuación contemplada.

Efecto negativo.- Aquel que se traduce en pérdida de valor naturalístico, estético-cultural, paisajístico, de productividad ecológica, o en aumento de los perjuicios derivados de la contaminación, de la erosión o colmatación y demás riesgos ambientales en discordancia con la estructura ecológico-geográfica, el carácter y la personalidad de una localidad determinada.

Efecto directo.- Aquel que tiene una incidencia inmediata en algún aspecto ambiental.

Efecto indirecto o secundario.- Aquel que supone incidencia inmediata respecto a la interdependencia, o, en general, respecto a la relación de un sector ambiental con otro.

Efecto simple.- Aquel que se manifiesta sobre un solo componente ambiental, o cuyo modo de acción es individualizado, sin consecuencias en la inducción de nuevos efectos, ni en la de su acumulación, ni en la de su sinergia.

Efecto acumulativo.- Aquel que al prolongarse en el tiempo la acción del agente inductor, incrementa progresivamente su gravedad, al carecerse de mecanismos de eliminación con efectividad temporal similar a la del incremento del agente causante del daño.

Efecto sinérgico.- Aquel que se produce cuando el efecto conjunto de la presencia simultánea de varios agentes supone una incidencia ambiental mayor que el efecto suma de las incidencias individuales contempladas aisladamente.

Efecto a corto, medio y largo plazo.- Aquel cuya incidencia puede manifestarse, respectivamente, dentro del tiempo comprendido en un ciclo anual, antes de cinco años, o en período superior.

Efecto permanente.- Aquel que supone una alteración indefinida en el tiempo de factores de acción predominante en la estructura o en la función de los sistemas de relaciones ecológicas o ambientales presentes en el lugar.

Efecto temporal.- Aquel que supone alteración no permanente en el tiempo, con un plazo temporal de manifestación que puede estimarse o determinarse.

Efecto reversible.- Aquel en el que la alteración que supone puede ser asimilada por el entorno de forma medible, a medio plazo, debido al funcionamiento de los procesos naturales de la sucesión ecológica, y de los mecanismos de auto depuración del medio.

Efecto irreversible.- Aquel que supone la imposibilidad, o la "dificultad extrema", de retornar a la situación anterior a la acción que lo produce.

Efecto recuperable.- Aquel en que la alteración que supone puede eliminarse, bien por la acción natural, bien por la acción humana, y, asimismo, aquel en que la alteración que supone puede ser reemplazable.

Efecto irrecuperable.- Aquel en que la alteración o pérdida que supone es imposible de reparar o restaurar, tanto por la acción natural como por la humana.

Efecto periódico.- Aquel que se manifiesta con un modo de acción intermitente y continúa en el tiempo.

Efecto de aparición irregular.- Aquel que se manifiesta de forma imprevisible en el tiempo y cuyas alteraciones es preciso evaluar en función de una probabilidad de ocurrencia, sobre todo en aquellas circunstancias no periódicas ni continuas, pero de gravedad excepcional.

Efecto continuo.- Aquel que se manifiesta con una alteración constante en el tiempo, acumulada o no.

Efecto discontinuo.- Aquel que se manifiesta a través de alteraciones irregulares o intermitentes en su permanencia.

Impacto ambiental compatible.- Aquel cuya recuperación es inmediata tras el cese de la actividad, y no precisa prácticas protectoras o correctoras.

Impacto ambiental moderado.- Aquel cuya recuperación no precisa prácticas protectoras o correctoras intensivas, y en el que la consecución de las condiciones ambientales iniciales requiere cierto tiempo.

Impacto ambiental severo.- Aquel en el que la recuperación de las condiciones del medio exige la adecuación de medida protectoras o correctoras, y en el que, aun con esas medidas, aquella recuperación precisa un período de tiempo dilatado.

Impacto ambiental crítico.- Aquel cuya magnitud es superior al umbral aceptado. Con él se produce una pérdida permanente de la calidad de las condiciones ambientales, sin posible recuperación, incluso con la adopción de medidas protectoras o correctoras.

1.6.2. LEGISLACIÓN SOBRE CONTAMINACIÓN DE METALES

1.6.2.1. Límites de metales en suelos y sedimentos

Zn

La legislación española cita un nivel máximo de zinc en suelos agrícolas de 150 mg/kg para un suelo de $\text{pH} < 7$ y de 450 mg/kg para uno de $\text{pH} > 7$; por otra parte los límites máximos de zinc en lodos de depuradoras para uso agrícola es de 2500 mg/kg para un $\text{pH} < 7$ y de 4.000 mg/kg para uno de $\text{pH} > 7$ (R.D. 1310/1990). La legislación de Turquía da un valor de 500 mg/kg como límite de suelo contaminado y de 3.000 mg/kg como límite de suelo extremadamente contaminado (T.S.P.C.R., 2000), de igual modo que ocurre con la legislación de Holanda (Ewers, 1991). Por su parte, tanto la legislación del

Ministerio de Medio Ambiente de Québec (Ministere de l'Environnement du Québec, 2001) como la legislación italiana (Abollino *et al.*, 2002) apuntan un límite para considerar un suelo como contaminado de 1500 mg/kg de zinc.

Pb

La legislación española cita un nivel máximo en suelos agrícolas de 50 mg/kg para un suelo de pH<7 y de 300 mg/kg para uno de pH>7; por otra parte, los límites máximos de plomo en lodos de depuradora para uso agrícola son 750 mg/kg para un pH<7 y de 1200 mg/kg para uno de pH>7 (R.D. 1310/1990). La legislación de Turquía da un valor de 150 mg/kg como límite de suelo contaminado y de 600 mg/kg como límite de suelo extremadamente contaminado (T.S.P.C.R., 2.000), de igual modo sucede con la legislación de Holanda (Ewers, 1.991). Por su parte tanto la legislación del Ministerio de Medio Ambiente de Québec (Ministere de l'Environnement du Québec, 2001) como la legislación italiana (Abollino *et al.*, 2002) apuntan un límite para considerar un suelo como contaminado de 1000 mg/kg de plomo.

Cu

En cuanto a la concentración de cobre, la legislación española cita un nivel máximo del metal en suelos agrícolas de 50 mg/kg para un suelo de pH<7 y de 210 mg/kg para uno de pH>7; por otra parte, el límite máximo de cobre en lodos de depuradora para uso agrícola es de 1000 mg/kg para un pH<7 y de 1.750 mg/kg para uno de pH>7 (R.D. 1310/1990). La legislación de Turquía da un valor de 100 mg/kg como límite de suelo contaminado y de 500 mg/kg como límite de suelo extremadamente contaminado (T.S.P.C.R., 2000); de igual modo sucede con la legislación de Holanda (Ewers, 1991). Por su parte, la legislación del Ministerio de Medio Ambiente de Québec (Ministere de l'Environnement du Québec, 2001) apunta un límite para considerar un suelo como contaminado de 500 mg/kg de cobre; por el contrario la legislación italiana (Abollino *et al.*, 2002) marca como límite 600 mg/kg de cobre.

Cd

Para la concentración de cadmio, la legislación española cita un nivel máximo en suelos agrícolas de 1 mg/kg para un suelo de pH<7 y de 3 mg/kg para uno de pH>7. Por otra parte, los límites máximos de cadmio en lodos de depuradora para uso agrícola son de 20 mg/kg para un pH<7 y de 40 mg/kg para uno de pH>7 (R.D. 1310/1990). La legislación de Turquía da un valor de 5 mg/kg como límite de suelo contaminado y de 20 mg/kg como límite de suelo extremadamente contaminado (T.S.P.C.R., 2000), de igual modo sucede con la legislación de Holanda (Ewers, 1.991). Por su parte la legislación italiana (Abollino *et al.*, 2002) marca un límite de 10 mg/kg de cadmio para considerar un suelo como contaminado.

1.6.2.2. Límites de metales en el agua

El establecimiento de las legislaciones ambientales de calidad, tienen por objetivo establecer los criterios sanitarios que deben cumplir las aguas de consumo humano y las instalaciones que permiten su suministro, desde la captación hasta el grifo del consumidor y el control de éstas, garantizando su salubridad, calidad y limpieza con el fin de proteger la salud de las personas de los efectos adversos derivados de cualquier tipo de contaminación. En la Tabla 1.3 se relacionan las sustancias químicas que afectan a la potabilidad del agua, según la OMS, (1971) y la Norma Española (BOE, 21-2-2003). Mayor información sobre este aspecto puede verse en el BOE, 21 febrero 2003, donde se relacionan otro grupo de criterios de calidad e indicadores de contaminación de las aguas subterráneas.

Tabla 1.3. Sustancias químicas que afectan a la potabilidad del agua.				
Organización Mundial de la Salud (OMS) 1971			Norma Española (BOE, 21 febrero 2003)	
Sustancias	Concentración máxima aceptable	Concentración máxima permitida	Concentración máxima aceptable	Concentración máxima permitida
Sólidos totales	500	1000	500	1000
Color (escala del platino Cobalto)	5	50	15	50
Turbidez (en mg/L de SiO ₂)	5	25	1 (salida)	5 (en la red)
Gusto	No detectable	No detectable	No detectable	No detectable
pH	7-8.5	6.5-9.2	6.5	9.5
Conductividad (micoS/cm a 20 °C)			2500	2500
Calcio (mg/L)	75	200		200
Magnesio (mg/L)	50	150	50	150
Si SO ₄ >250 mg/L	30	30	30	30
Si SO ₄ <250 mg/L	125	125	125	125
Sulfato (mg/L)	200	400	250	250
Cloruro (mg/L)	200	600	250	250
H ₂ S	0,05		0,05	
Sodio			200	200
Hierro (mg/L)	0,3	1	0,3	0,2
Manganeso (mg/L)	0,1	0,5	0,05	0,05
Cobre (mg/L)	0,05z	1,5	2	
Zinc (mg/L)	5	15	5	15
Níquel (mg/L)			0,02	
Sustancias químicas que pueden afectar la salud				
Sustancias				
Fluor	0.5	1.5	1.5	
Nitrato	45	100	50	
Sustancias tóxicas				
Sustancias				
Plomo (mg/L)	<0,1	<0,1	0,025	
Selenio (mg/L)	0,01		0,01	0,010
Arsénico (mg/L)	<0,05	<0,05	0,01	
Cromo hexavalente (mg/L)	0,05		0,05	
Cianuro	0,2		0,05	
Cadmio (mg/L)	0,01		0,005	
Boro (mg/L)	1		1	1
Mercurio (mg/L)	0,01		0,001	
Plata (mg/L)	0,05		0,05	
Cobre (mg/L)			0,002	
Indicadores químicos de polución				
Indicador				
Demanda química de oxígeno (DQO) mg O ₂ /l	10	10	5	5
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	6	6	6	6
Nitrógeno total (excluido el NO ₃)	1	1	1	1
NH ₃	0.5	0.5	0.5	0.5
Carbono (extracto de cloroformo)	0.5	0.5	0.5	0.5
Grasas	1	1	1	1
Parámetros microbiológicos (0 UFC en 100 ml)				
Escherichia coli	0	0	0	0
Enterococo	0	0	0	0
Clostridium perfringens (incluidas las esporas)	0	0	0	0

1.6.2.3. Límite de metales en dieta alimenticia humana

La máxima concentración de metales, permitidos para el consumo humano, son los que se indican en la Tabla 1.4.

Tabla 1.4. Valores límite en las personas. ATSDR – Nivel mínimo de riesgo para sustancias peligrosas (MRLs).

Sustancia	MRLs (nivel mínimo de riesgo)	Unidad
Arsénico	0,005	Vía oral. mg/kg/día
Cadmio	0,0002	
Cobre	0,02	
Estroncio	2	
Zinc	0,3	
Manganeso	0,00004	Inhalación. mg/m ³
Mercurio	0,0002	

**CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA
DE ESTUDIO: SIERRA DE CARTAGENA-LA
UNIÓN (MURCIA-ESPAÑA)**

CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO: SIERRA DE CARTAGENA-LA UNIÓN (MURCIA-ESPAÑA)

El estudio del riesgo e impacto ambiental de una zona determinada requieren del conocimiento del medio físico y las variables que lo integran. En este Capítulo se realiza un análisis del área de estudio: Sierra de Cartagena-La Unión y las variables que la caracterizan. Se incide con mayor detalle en la zona donde se han desarrollado los procesos minero-metalúrgicos: Zona Central de la Sierra Minera (Figura 2.1). Para ello se analiza y sintetiza la información existente en cada uno de los apartados del Capítulo, la cual es muy abundante en lo relativo a geología y minería, dada la importancia que ha tenido este distrito minero a lo largo de la historia en el desarrollo socio-económico de la región.

2.1. SITUACIÓN GEOGRÁFICA

Se denomina Sierra de Cartagena-La Unión (también referida de forma simplificada como Sierra Minera), a una elevación montañosa, geográficamente bien definida y situada en el sureste de la Región de Murcia (España), incluida en los términos municipales de Cartagena y La Unión. Los núcleos de población más destacables, de este a oeste, son los siguientes: Cabo de Palos, Los Belones, El Estrecho, Llano del Beal, Portman, La Unión, Escombreras y Cartagena. (Figura 2.1).

Está limitada en su parte septentrional por el denominado “Campo de Cartagena”, que es una llanura levemente inclinada hacia el Este (Mar Menor), y en la meridional por el Mar Mediterráneo.

La zona central de la Sierra Minera ocupa una extensión aproximada de 50 km². Comprende parte del término municipal de Cartagena y la totalidad del de La Unión. Por el Oeste limita con las elevaciones de La Parreta (Alumbres), pasa por borde oriental de los picos del Manchón y del Horcado y cierra por el cabezo del Aljibe con la bahía del Gorguel. Por el Este limita con las explotaciones mineras de Los Blancos, el campo de Golf de Atamaría (Los Belones) y bahía de Portman.



Figura 2.1. Situación geográfica de la Sierra de Cartagena-La Unión. Mapa reducido del original a escala 1:200.000.

2.2 RELIEVE

La Sierra Minera está constituida por un conjunto orográfico limitado al Sur por el Mar Mediterráneo y al Norte por el Campo de Cartagena. Ocupa una extensión aproximada de 100 km² y se extiende en una banda de 23 km de largo, de dirección E-O, desde Cabo de Palos a Cartagena y unos 4 km de anchura media, de dirección N-S. Esta formación montañosa se inicia por el Este en las proximidades de la población de Cabo de Palos, en el Cerro de los Cuervos (97 m s.n.m.), y va ganando altitud hacia el Oeste, en las sierras del Llano del Beal, La Unión y Cartagena.

Entre las cimas principales destacan, de Este a Oeste, el Cabezo de la Fuente (338 m s.n.m.) al Sur de los Belones; Monte de las Cenizas (303 m s.n.m.) al Sureste de Portman; la Peña del Águila (392 m s.n.m.) al Norte de Portman, las sierras de la Fausilla (368 m s.n.m.) y Gorda (331 m s.n.m.) al Sur y Norte respectivamente del Valle de Escombreras y el Cabezo de San Julián (293 m s.n.m.) al Sureste de Cartagena (Figura 2.1).

La vertiente Sur de la sierra es de pendientes pronunciadas hacia el mar (mayores del 15%) (Figura 2.2). Se encuentran multitud de calas, la mayoría de ellas solo accesibles por mar como las de Huncos, Mulas, del Cuervo, Gotera, etc.; y otras que pueden serlo por tierra, tales como Cala Reona, Playas de Calblanque, Cala del Cuervo (Atamaría),

Bahía de Portman, Cala del Gorguel. También existen tres cabos: Palos, Negrete (monte de las Cenizas) y Agua (Sierra de la Fausilla) (Figura 2.1).

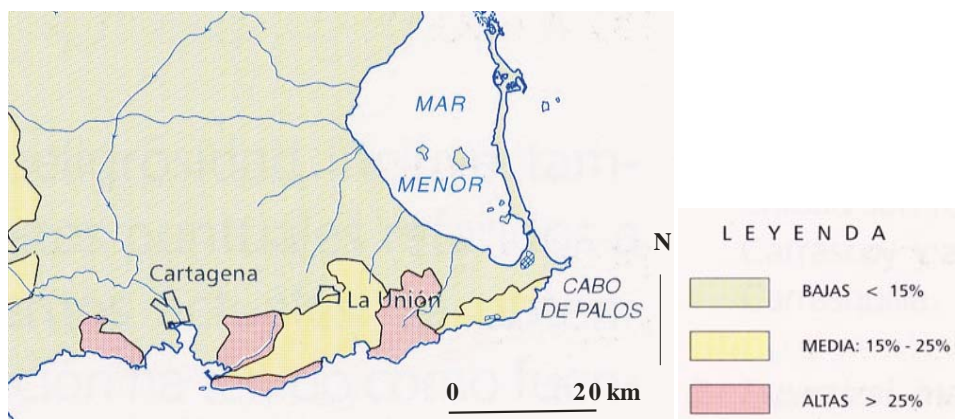


Figura 2.2. Mapa de Pendientes (IGME, 1999b).

2.3. HIDROGRAFÍA

La zona estudiada se localiza dentro de dos dominios ambientales completamente distintos; por un lado, al Sur se encuentra la Sierra de Cartagena-La Unión, con sus numerosas e importantes explotaciones de carbonatos, sulfatos y sulfuros, cuya actividad se remonta a tiempos pre-romanos, llegando hasta finales del año 1991; por otro lado, se encuentra la comarca del Mar Menor, con gran repercusión turística.

La característica hidrológica común, en ambos dominios, es la existencia de corrientes de aguas superficiales (ramblas) de régimen no continuo o intermitente, que funcionan en época de lluvias, a consecuencia del régimen climático típico del mediterráneo.

En la Tabla 2.1 y Figura 2.3 se indican, para las ramblas que atraviesan la Sierra, algunos parámetros significativos, tales como el lugar donde vierten sus aguas, área, perímetro, longitudes de los cauces, desnivel absoluto y pendiente media de la cuenca.

Tabla 2.1. Características de las ramblas de la Sierra de Cartagena-La Unión.

Rambla	Vierten a:	Superficie (km ²)	Perímetro (km)	Longitud de los cauces (km)	Desnivel absoluto (m)	Pendiente media (%)
La Carrasquilla	Mar Menor	29	25,82	10,60	232	1,25
Ponce	Mar Menor	11,96	16,66	6,46	384	3,08
Beal	Mar Menor	7,6	17,35	7,22	242	1,92
Matildes	Mar Menor	17,38	26,15	6,73	379	3,22
Miedo	Mar Menor	36,87	30,56	7,78	386	2,84
Portman	Mar Mediterráneo	10,77	16,09	2,28	302	7,54
Gorguel	Mar Mediterráneo	3,4	10,4	4,0	322	4,61
Escombreras	Mar Mediterráneo	26,77	26,47	6,72	220	1,63
Sta Lucía	Mar Mediterráneo	5,05	10,1	2,92	210	4,12
El Hondón	Mar Mediterráneo	19,55	23,99	7,48	198	1,52

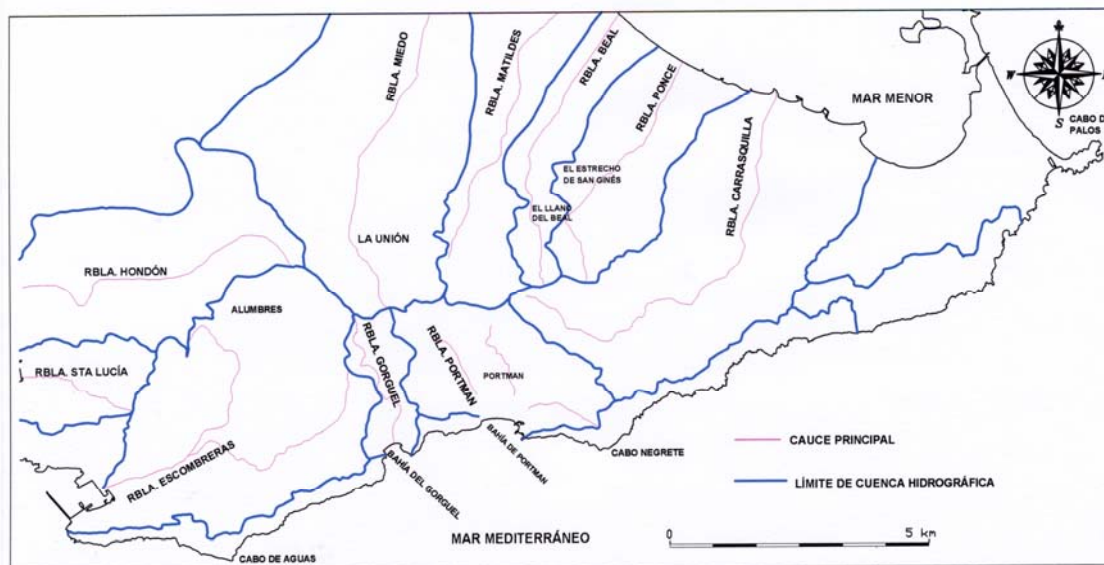


Figura 2.3. Esquema de las cuencas hidrográficas de la Sierra de Cartagena-La Unión. Mapa reducido del original a escala 1:200.000.

2.4. CLIMATOLOGÍA

El desarrollo de cualquier estudio de impacto y riesgo ambiental requiere del conocimiento de las variables ambientales del área de estudio, ya que condicionan el clima y el ciclo hidrológico de la misma.

En el estudio climatológico de la Sierra de Cartagena-La Unión se han analizado las variables de precipitación y temperatura, correspondientes a 13 estaciones meteorológicas, para el periodo comprendido entre 1975 y 1998, cuyos datos de base han sido tomados del Instituto Nacional de Meteorología. Para la variable viento los datos se han tomado del Instituto Nacional de Meteorología (INM, 1998) concretamente de la Estación del aeródromo de San Javier para el periodo 1961-1990 (Figura 2.4 y Tabla A2.1 ver en anexo).

2.4.1. PRECIPITACIONES

Dentro de las diferentes variables que caracterizan el clima de una región, las precipitaciones constituyen una de las fundamentales, pues condicionan el desarrollo de diferentes procesos fisicoquímicos e hidrológicos de ésta. En la Sierra Minera las precipitaciones se han desarrollado en tres formas: lluvia, nieve y granizo. El análisis se centra en las precipitaciones en forma de lluvia, pues representan el 99,2% del volumen medio anual (Tabla A2.2 ver en anexo).



Figura 2.4. Localización de las estaciones meteorológicas. E-1: Cartagena Puerto; E-2: Corvera; E-3: El Algar; E-4: Fuente Álamo; E-5: Los Martínez del Puerto; E-6: Murcia San Javier; E-7: Murcia San Majín; E-8: Pozo Estrecho; E-9: Salinas de Cabo de Palos; E-10: San Pedro del Pinatar; E-11: Sucina; E-12: Torre Pacheco CCA; E-13: Torre Pacheco Torre Blanca.

2.4.1.1. Lluvia

Como es característica general de todo el Sureste y Levante español, la distribución de la lluvia es muy irregular, tanto espacial como temporal.

En la Figura 2.5 se pone de manifiesto la escasez e irregularidad de las precipitaciones medias anuales que, para las trece estaciones pluviométricas estudiadas, oscilan entre los 544 mm de valor máximo del año 1989 y los 104 mm de valor mínimo del año 1995, siendo el valor medio, para el periodo 1975 a 1998, de 285 mm. (Tabla A2.2 ver en anexo)

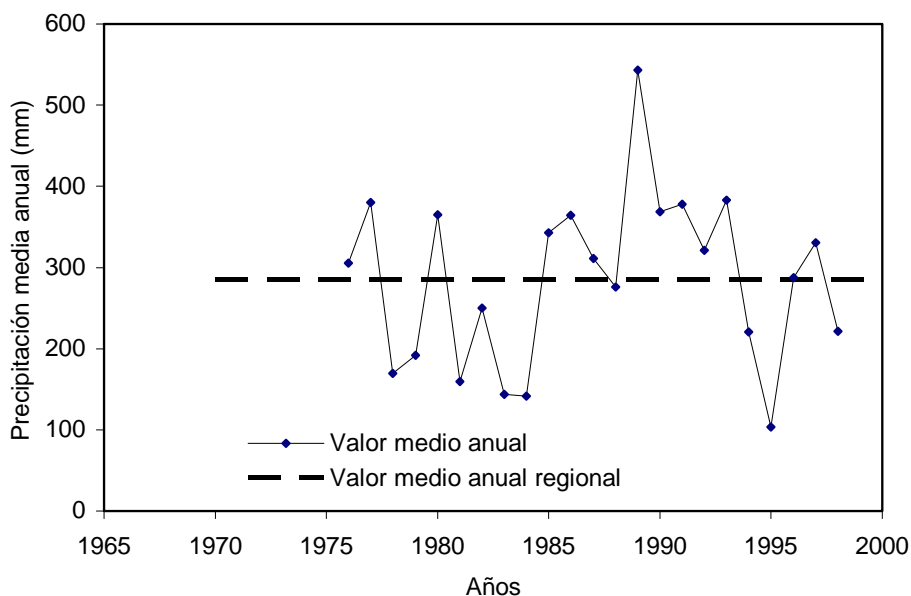


Figura 2.5. Precipitación media anual (periodo 1975 a 1998). Datos del INM y elaboración propia.

Dentro del periodo analizado, el año 1989 fue el más húmedo, con lluvias que oscilaron entre los 437 mm, en la estación E7-021 y los 717 mm, de la estación E6-031. Hay que destacar el valor mínimo de 60 mm en el año 1995, en la estación E-10-032.

Según el mapa de isoyetas de la Figura 2.6, la distribución de la lluvia en la zona de estudio, está comprendida entre 270 mm al Este (zona de Cabo de Palos), y 300 mm al Oeste (Cartagena ciudad).



Figura 2.6. Mapa de Isoyetas (periodo 1975 a 1998). Datos del INM y elaboración propia.

Los valores medios de las precipitaciones mensuales (Figura 2.7) oscilan entre los 36 mm de máxima, en el mes de enero, y los 5 mm de mínima, en julio, siendo los valores promedio del periodo analizado de 48 mm de máxima en el mes de enero, para la estación E-3 y el mínimo de 3 mm del mes de julio, en la estación E-1.

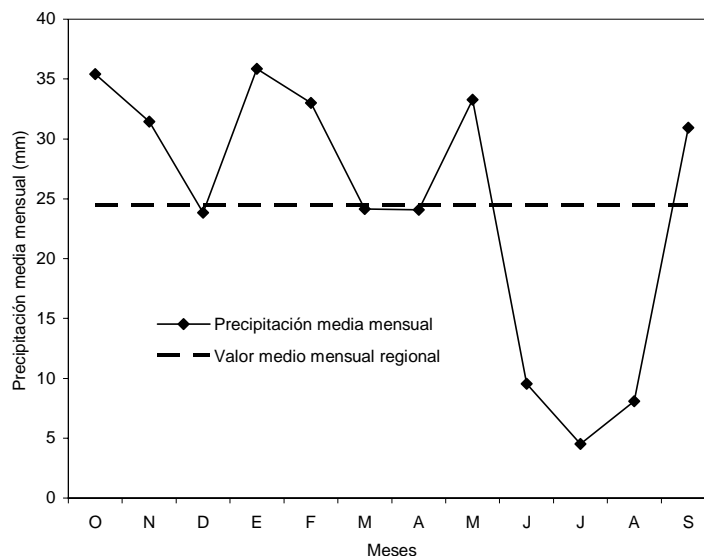


Figura 2.7. Precipitación media mensual (periodo 1975 a 1998). Datos del INM y elaboración propia.

Los mayores valores de precipitación del periodo analizado se registran en invierno, con 91 mm (Tabla A2.3 ver en anexo), siendo el mes de enero con 35 mm el de mayor pluviometría. En septiembre con 31 mm las precipitaciones son similares.

Es de señalar que el carácter torrencial de las lluvias es un factor muy importante, pues interviene en los procesos de erosión y modelado del relieve. Aunque la precipitación anual es escasa, las tormentas son frecuentes y suelen ir acompañadas de aguaceros de gran intensidad en cortos espacios de tiempo. En la estación E6-031 Murcia-San Javier, la precipitación máxima registrada en 24 horas fue de 173 mm (1951-80) en el mes de octubre (Font, 1983).

2.4.2. TEMPERATURA

De las trece estaciones climatológicas estudiadas, solo disponen de datos térmicos siete de ellas. Las temperaturas medias anuales de la zona son muy regulares, con un máximo de 18,63 °C, en el año 1989, y mínimo de 17,13 °C, en el año 1975 (Figura 2.8); siendo la amplitud térmica, para el periodo estudiado, de tan solo 1,5 °C, y el valor medio de 17,89 °C (Tabla A2.4 ver en anexo).

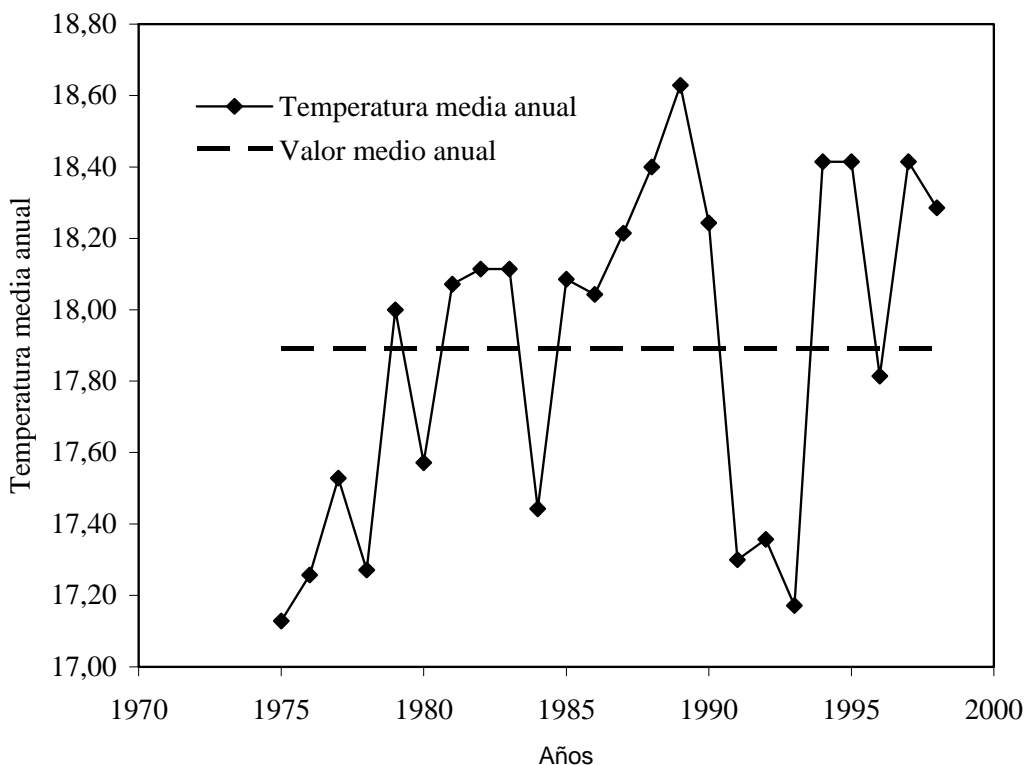


Figura 2.8. Temperatura media anual (periodo 1975 a 1998). Datos del INM y elaboración propia.

El mes más caluroso es Agosto, con una temperatura media de 25,67 °C, y el más frío Enero con 11,20 °C, por lo que la evolución de la temperatura a lo largo del año produce una amplitud térmica de 14,47 °C.

Hay que destacar que la temperatura media mensual más elevada, la tiene la estación E-4 en el mes de Agosto, alcanzando los 27,39 °C, y la más baja la estación E-6, que en el mes de Enero alcanza los 10,77 °C (Figura 2.9 y Tabla A2.5 ver en anexo).

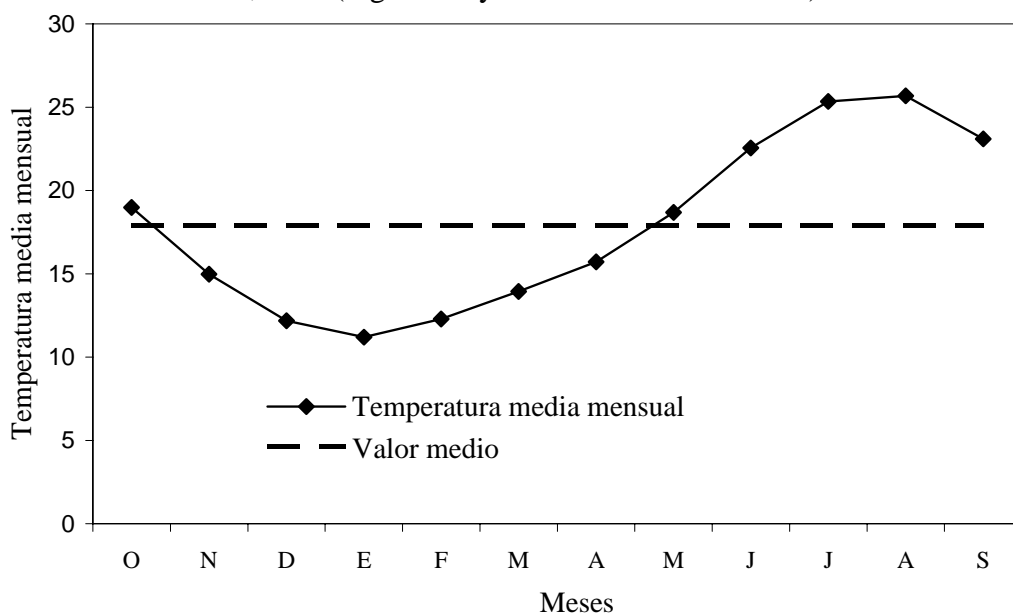


Figura 2.9. Temperatura media mensual (periodo 1975 a 1998). Datos del INM y elaboración propia.

Hay que señalar la suavidad de las temperaturas a lo largo de todo el año, que en el 50% se supera la media de las máximas que es de 18°C, y para el mismo período (mayo-octubre), el valor de la temperatura media de las mínimas supera los 12,5°C.

Existe un máximo absoluto de 40°C y un mínimo de -5,4°C para la estación E6-031 Murcia-San Javier, pero estas temperaturas se producen en escasos días, principalmente en verano (Font, 1983).

Según el mapa de isotermas de la Figura 2.10 la distribución de la temperatura en la zona de estudio está comprendida entre 18°C al Este (zona de Cabo de Palos) y 18,3°C al Oeste (Cartagena ciudad).



Figura 2.10. Mapa de Isotermas (periodo 1975 a 1998). Datos INM y elaboración propia.

2.4.3. EVAPOTRANSPIRACIÓN

Para establecer el balance hídrico de una cuenca hidrológica o bien de una determinada zona, uno de los factores más importante que hay que calcular es la evapotranspiración.

En este trabajo, la evapotranspiración (ET) engloba en un solo término el fenómeno físico de la evaporación y el biológico de la transpiración, debido a las dificultades que presenta el cálculo por separado de ambos fenómenos.

Este fenómeno físico de la evapotranspiración, ha sido evaluado para 7 estaciones termo pluviométricas. La ETP se ha calculado por el método de Thornthwaite (Custodio y Llamas, 1996), obteniéndose los resultados de la Tabla 2.2 y Figura 2.11, donde se muestran los valores anuales de la evapotranspiración potencial (ETP), y de la evapotranspiración real (ETR), para las estaciones seleccionadas. Resulta evidente que se produce una evapotranspiración considerable, con el resultado de una importante

pérdida de agua del suelo. En la Figura 2.12 se han representado las Iso-ETR (1975-1998).

Tabla 2.2. Valores calculados para la Evapotranspiración potencial y real (Periodo 1975-1998) (INM, 1998).

Estación	ETP (mm)	ETR (mm)
E1-013	923,79	282
E3-016	923,25	342
E4-023	966,37	257
E8-026	821,38	266
E12-026U	889,50	293
E13-028I	894,85	273
E6-031	873,65	309

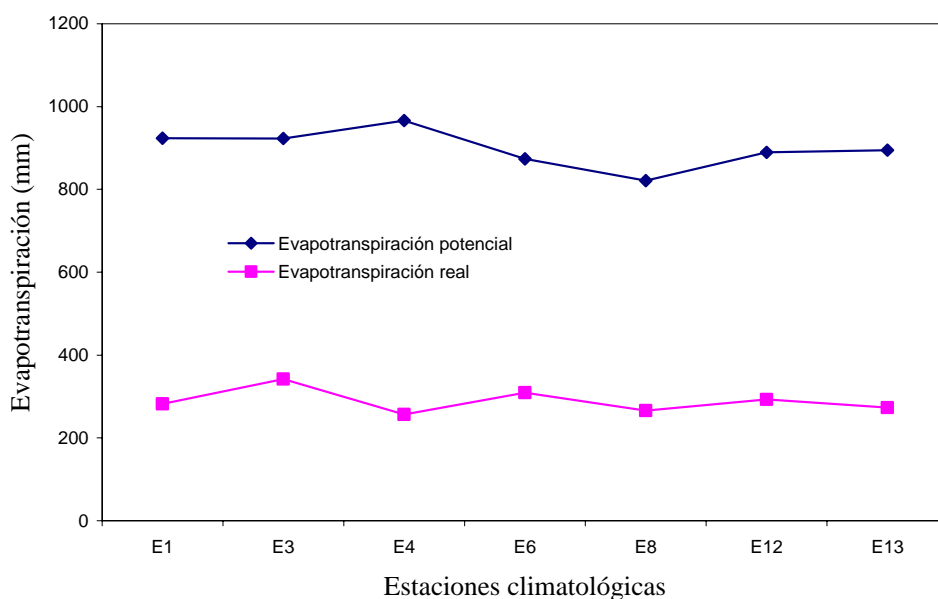


Figura 2.11. ETP y ETR (periodo 1975 a 1998).

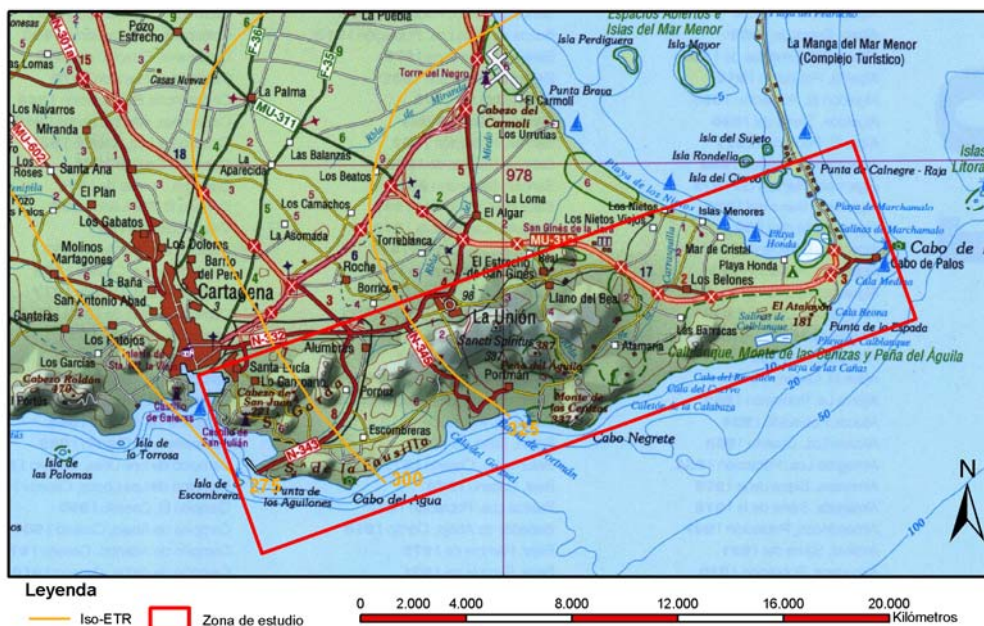


Figura 2.12. Mapa de Iso-ETR (periodo 1975 a 1998). Datos INM y elaboración propia.

2.4.4. VIENTOS

El viento es un fenómeno constante en el litoral de la zona de estudio. Los vientos más importantes son los de Levante, de dirección noreste a suroeste, de carácter húmedo y responsable de las lluvias del sudeste de la Península, cuya mayor frecuencia se da en verano; el Lebeche, de sur a sur-suroeste, es el responsable de las olas de calor estivales; el Jaloque es cálido y procede del sureste; y el Terral o Maestral es frío y del noroeste. Los datos del viento, tomados del INM (1998) correspondientes a la estación del aeródromo de San Javier, se resumen en la Tabla 2.3 y se representan en la Figura 2.13.

Tabla 2.3. Valores de velocidad del viento (km/h) en la Estación aeródromo de San Javier. Periodo: 1961-1990 (INM, 1998).

Dir. Dominante respecto al Norte	Primavera N60E	Verano N90E	Otoño N60E	Invierno N270E
Veloc. media	22,4	16,9	15,6	16,9
Nº días vel. >35	12,7	6,4	10,8	13,0
Nº días vel. >54	2,5	0,8	2,6	3,2
Nº días vel. >90	0,0	0,0	0,0	0,2
Racha máx.: Dir./vel.	30/107	50-70/83	210/95	100-240/104

En primavera los vientos dominantes son los del primer cuadrante (ENE), que con relativa frecuencia alcanzan valores entre 39 y 46 km/h; incluso, en el mes de junio, ocasionalmente llegan a los 55 km/h. En verano los que predominan son del E y ENE, con rachas de 37 a 46 km/h. En otoño se igualan los vientos del ENE y los del W, con velocidades comprendidas entre los 37 y 55 km/h. En invierno se igualan los de los cuadrantes 3º y 4º con un ligero predominio de los del W, que pueden alcanzar los 56 km/h en febrero. También son frecuentes los del 1º cuadrante con velocidades inferiores a los 56 km/h (Tabla 2.3).

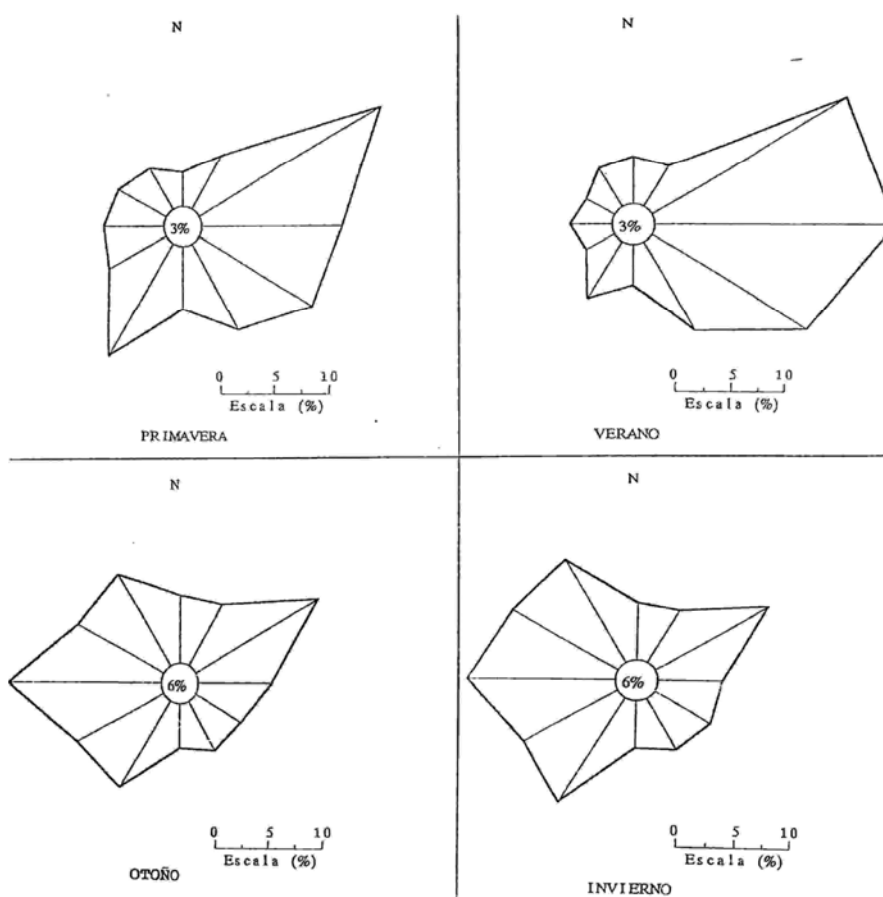


Figura 2.13. Rosa de vientos de las estaciones del año. Estación: aeródromo de San Javier. Periodo 1961 a 1990. Datos del INM (1998).

Los vientos que pueden arrastrar polvos procedentes de vertidos, afectando a los núcleos de población de La Unión y Portman, son los procedentes del S y WNW, respectivamente. Las velocidades más comunes de los vientos del S oscilan de 6 a 20 km/h en todo tipo de regímenes atmosféricos. Para los vientos del WNW las velocidades más frecuentes, para un régimen ligeramente inestable, es de 20 km/h, mientras que para atmósferas estables o neutras superan los 56 km/h.

2.5. VEGETACIÓN

2.5.1. MARCO BIOGEOGRÁFICO

La vegetación constituye uno de los elementos fundamentales del medio natural, por su carácter integrador de todos los factores medio ambientales.

La Sierra de Cartagena-La Unión se encuentra dentro de la provincia corológica Murciano-Almeriense, con origen en las inmediaciones de Adra y fin en la Hoya de Altea (Figura 2.14). Los límites de esta provincia son, al Norte: Provincias Catalana-Valenciano-Provenzal y al Oeste: provincia Bética (Alcaraz, 1999).

Dentro de la provincia Murciano-Almeriense la zona se inscribe en el sector Almeriense, subsector Almeriense Oriental. Dicho subsector está caracterizado por la presencia de un nutrido número de endemismos e iberoafriacanismos (Alcaraz, 1999).

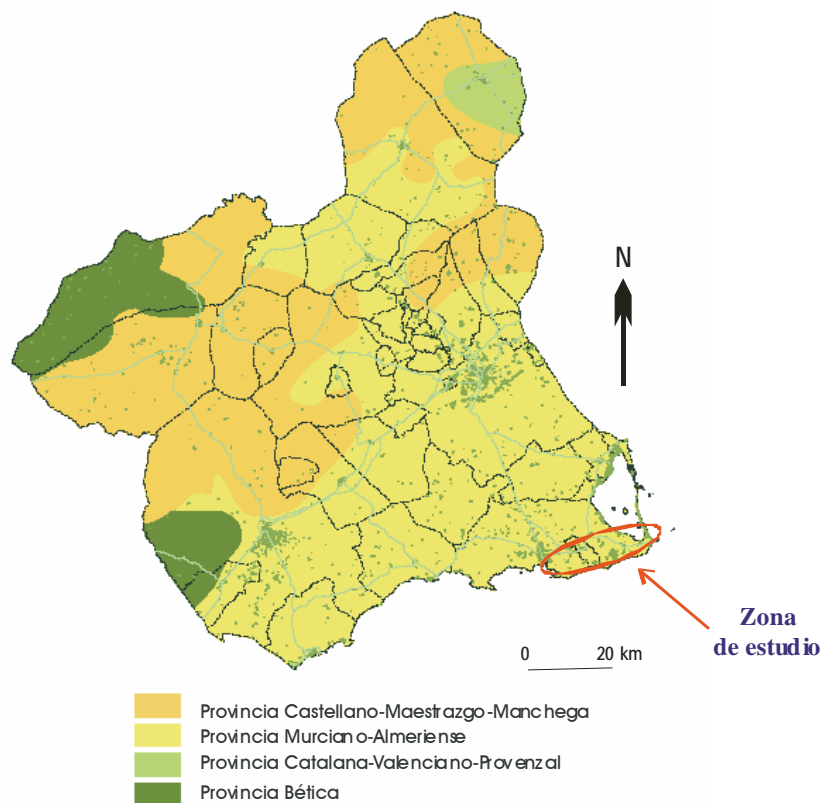


Figura 2.14. Mapa biogeográfico de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia (Alcaraz, 1999).

2.5.2. VEGETACIÓN POTENCIAL

El área de estudio se ubica en el dominio de la Serie termomediterránea murciano-almeriense semiárido-árida del cornical (*Periploca angustifolia*): *Mayteno europaei-Periploceto angustifoliae*.

Este dominio se extiende en forma de franja sensiblemente paralela a la costa desde Cabo de Palos hasta Cartagena, continuando después hacia occidente. El límite septentrional de la serie del cornical se extendería un poco más al norte de Sancti Spiritu, aproximadamente por las proximidades del paraje de “La Esperanza” (Alcaraz, 1989).

La vegetación potencial de esta serie se corresponde en su etapa madura con un matorral espinoso, más o menos denso, dominado por el cornical (*Periploca angustifolia*), en presencia de esparraguera (*Asparagus horridus*), espino negro (*Rhamnus lycioides*), arto (*Maytenus senegalensis*) y palmito (*Chamaerosps humilis*), con pies dispersos de acebuche (*Olea europaea, ssp europaea*) y algarrobo (*Ceratonia siliqua*) en zonas donde la humedad del suelo es más elevada.

La presencia de especies como el araar (*Tetraclinis articulata*) y la aliaga (*Calycotome intermedia*), en áreas asociadas con afloramientos de rocas calizas, se ha interpretado como una subasociación propia de la etapa madura de la serie del cornical. Sin embargo, del mismo modo se ha interpretado que la aparición de estas dos especies, junto con el pino carrasco (*Pinus halepensis*) y el palmito (*Chamaerops humilis*) caracterizan la formación madura de la serie termomediterránea semiárido seca inferior de la sabina mora o araar (*Tetraclinis articulata*): *Arisaro simorrhini-Tetraclineto articulatae* S. (Alcaraz, 1989).

La distribución de la serie del cornical sigue las variaciones del parámetro de continentalidad, en relación con las otras formaciones maduras del piso termomediterráneo. La influencia atenuadora del viento marino da origen en las zonas más elevadas o de mayor altitud a un microclima, caracterizado por un aumento de la humedad relativa y un menor rango de amplitud térmica a lo largo del año, que se constata en las laderas de exposición umbría del conjunto de la cuenca y a sotavento. Por tanto en estos sectores domina el piso termomediterráneo superior, donde son posibles las heladas en los meses de diciembre y enero. Perteneciendo las formaciones vegetales a la serie termomediterránea superior murciano-almeriense semiárida del lentisco (*Pistacia lentiscus*): *Chamaeropo humilis-Rhamneto lycioidis* S.

La vegetación climática que se corresponde con esta serie es un matorral impenetrable de lentisco (*Pistacia lentiscus*), al que acompañan espino negro, acebuche y esparraguera.

2.5.2.1 Asociaciones vegetales

Las asociaciones vegetales de las etapas maduras de las series presentes en la zona son: *Mayteno europaei-Periplocetum angustifoliae*: esta asociación se extiende por las áreas costeras de las provincias de Murcia y Almería en las que no se registran heladas y la temperatura media anual supera los 17°C. Se trata de una vegetación xerófita, adaptada a la aridez, como ocurre con el resto de las asociaciones de la Provincia Corológica Murciano Almeriense. Sin embargo en sus dominios, la humedad ambiental proporcionada por la cercanía al mar reduce la evapotranspiración y aumenta las disponibilidades de agua.

La vegetación esta compuesta por un matorral espinoso, que ya ha sido descrito en el anterior punto (cornical, arto, palmito, esparragueras, espino negro), en el que pueden aparecer acebuches y algarrobos. Dicho matorral solo es reconocible en unos pocos sectores de la cuenca debido a la degradación sufrida por la intensa actividad antrópica en la zona de estudio (Sierra Minera).

Chamaeropo humilis-Rhamnetum lycioides: es la etapa madura de la serie que le da nombre. Sus dominios ocupan áreas próximas a las de la asociación anterior, aunque como dijimos de mayor continentalidad y donde las heladas son posibles, si bien poco intensas. En la zona de estudio ocupa la ladera norte de mayores alturas.

Lapiedro martinezii-stipetum tenacissimae: la constituyen espartizales termo y mesomediterráneos inferiores seco-semiáridos ibérico-meridionales, se asientan sobre suelos de distinta naturaleza, pero con profundidad media. Esta dominada por la *Stipa tenacísima*, a la que acompañan algunas pequeñas gramíneas (*Dactylis hispanica*, *Avenula murcica*) y geófitos (*Distichoselinum tenuifolium*, *Lapiedra martinezii*, *Allium sphaerocephalon*). Supone la primera etapa de degradación del matorral alto, tanto en los horizontes inferior como superior del piso termomediterráneo, en la zona de estudio. Se encuentra densas manchas en las laderas de solana de dicha zona, e incluso se observa su proliferación en los márgenes del depósito. En la zona más elevada se enriquece con *Helictotrichion Filifolium*.

Phagnalo saxatilis-Euphorbietum squamigerae: esta asociación vegetal se caracteriza por estar presente en los sectores de suelos pedregosos, al pie de cantiles y en los medios alterados, en las laderas de solana del conjunto de la cuenca. Se trata de una vegetación nitrófila propia de los pisos termo y mesomediterráneo. En su óptimo se caracteriza por la presencia de *Euphorbia squamigera*, de la que se han encontrado pies dispersos en algunos sectores de estas zonas, en nuestro caso la presencia de esta asociación queda patente por la presencia de *Phagnalon saxatile* ampliamente distribuida sobre la superficie de la zona de estudio.

2.5.3. VEGETACIÓN ACTUAL

Es el resultado de la interacción entre el hombre y la naturaleza, cuyo estudio se hace observando y cartografiando directamente en el terreno. Para la zona de trabajo la vegetación actual se ha tomado del IGME (1999b) (Figura 2.15 www.carm.es/siga).

Como puede observarse la vegetación predominante de la Sierra Minera corresponde a matorral, con unas pequeñas zonas ocupadas por saladares y pinares.

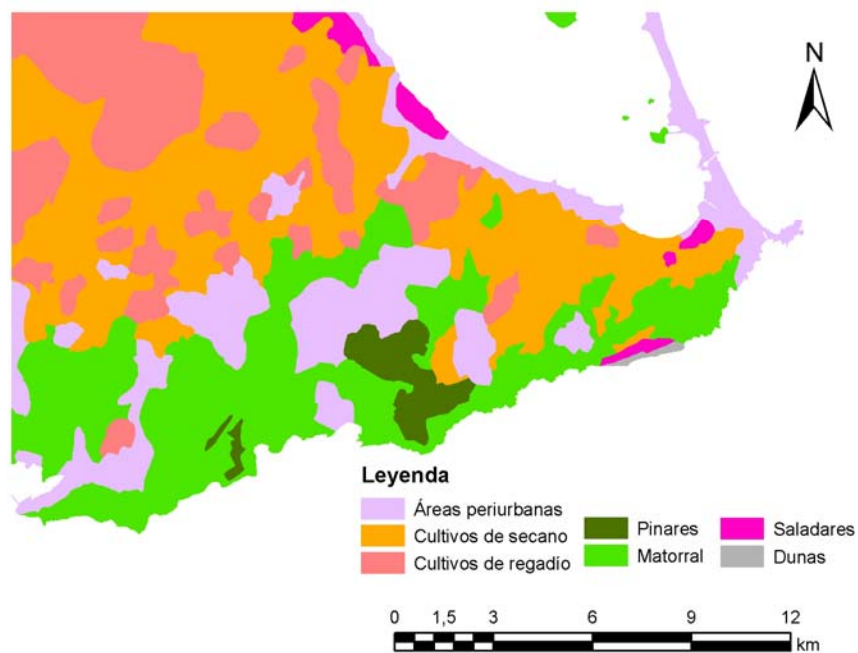


Figura 2.15. Mapa de Vegetación actual. C.A.R.M. D.G.M.N.

2.6. EDAFOLOGÍA

Los suelos de la zona de estudio presentan las características propias de las áreas de clima semiárido y mediterráneo, donde la irregularidad y torrencialidad de las lluvias, con un alto poder erosivo, eliminan la capa superficial debido a la ausencia de vegetación y, en consecuencia, permite un escaso desarrollo de los suelos.

La Figura 2.16 corresponde a una fracción del Mapa de síntesis edafológica (IGME 1999b), elaborado según el sistema de clasificación americano: U.S.D.A. Soil Toxonomy. Los tipos de suelos dominantes del área de estudio son los siguientes: Paleargid, Petrocálcico; Paleorthid, Típico y Xerollico; Calcirthid, Típico, Lítico y Xerollico.

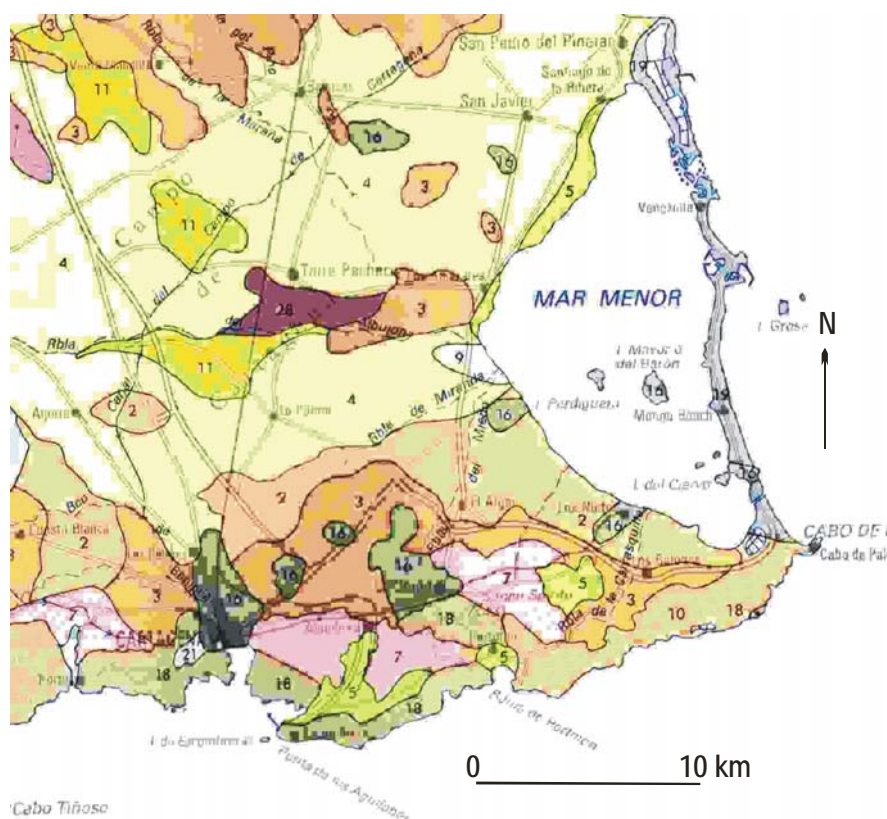
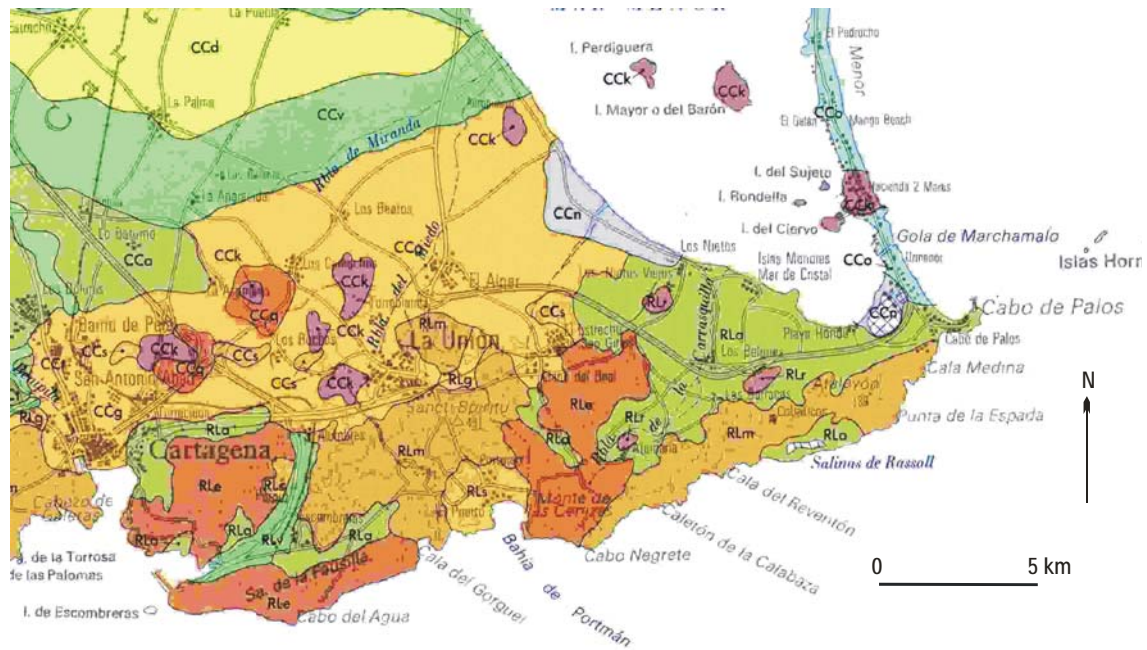


Figura 2.16. Mapa de Síntesis Edafológica. 2: Paleargid, Petrocálcico; 3: Paleorthid, Típico y Xerollico; 5: Calcirthid, Típico, Lítico y Xerollico; 7: Calcirthid, Típico, Lítico y Xerollico; 10: Calcirthid, Típico, Lítico y Xerollico; 16: Torriorthent, Típico y Lítico; 18: Torriorthent, Típico y Lítico. (ITGE, 1999b).

2.7. GEOMORFOLOGÍA

Desde el punto de vista fisiográfico, la Sierra de Cartagena-La Unión se trata de una sierra litoral, cuya morfología la componen un conjunto de cumbres de altura media y vertientes desnudas, con un rápido descenso hacia el mar en dirección Sur, lo cual da lugar a la formación de una costa muy escarpada, salpicada de calas y promontorios rocosos. Hacia el Norte las pendientes son más suaves y forman la planicie del Campo de Cartagena (Figura 2.17).



LEYENDA

CONJUNTOS FISIOGRAFICOS	DOMINIOS MORFOESTRUCTURALES	
RELIEVES (R)	Relieves Litorales Relieves Preitorales Relieves Interiores del Subbético Relieves Exteriores del Prebético	RL RB RS RP
DEPRESIONES (C)	Cuenca de Lorca Cuenca de Mula Cuenca de Fortuna Campo de Cartagena	CL CM CF CC
GRANDES VALLES (V)	Valle Bajo del Segura Valle Medio del Segura Valle del Guadalentín	VS VM VG

SISTEMAS MORFOGENETICOS	UNIDADES GEOMORFOLOGICAS	
SISTEMA LADERAS - INTERFLUVIOS	Cumbres; Cuerdos y Crestas	c
	Laderas desnudas y escarpadas	e
	Laderas medias; Colinas	m
	Laderas suaves; Lomas	s
	Laderas de incisión fluvial	f
	Piedemonte	p
	Coluviones	h
	Glacis	g
	Relieves residuales	r
	Relieves volcánicos	K
SISTEMA FLUVIAL	Superficies estructurales	x
	Damos salinos	D
	Fondos de valle	v
	Terrazas	t
	Canos y Abanicos aluviales	a
SISTEMA EOLICO	Llanura de inundación	i
	Tabas y Travertinos	i
SISTEMA LITORAL	Dunas; Arenas; Manto Eólico	d
	Terrazas marinas	l
	Playas	q
	Cardón litoral	o
	Marisma	n

Figura 2.17. Mapa Geomorfológico (ITGE 1999b).

2.8. MARCO GEOLÓGICO

2.8.1. CONTEXTO GEOLÓGICO DEL ÁREA DE ESTUDIO

La Sierra de Cartagena-La Unión constituye el extremo suroriental de las Cordilleras Béticas. Sus relieves, que no superan los 400 metros de altitud, se extienden en dirección aproximadamente Este-Oeste entre el Mediterráneo y la llanura del Mar Menor. La Sierra de Cartagena-La Unión corresponde a la Zona Bética s.s., o "dominio interno" (Figura 2.18).

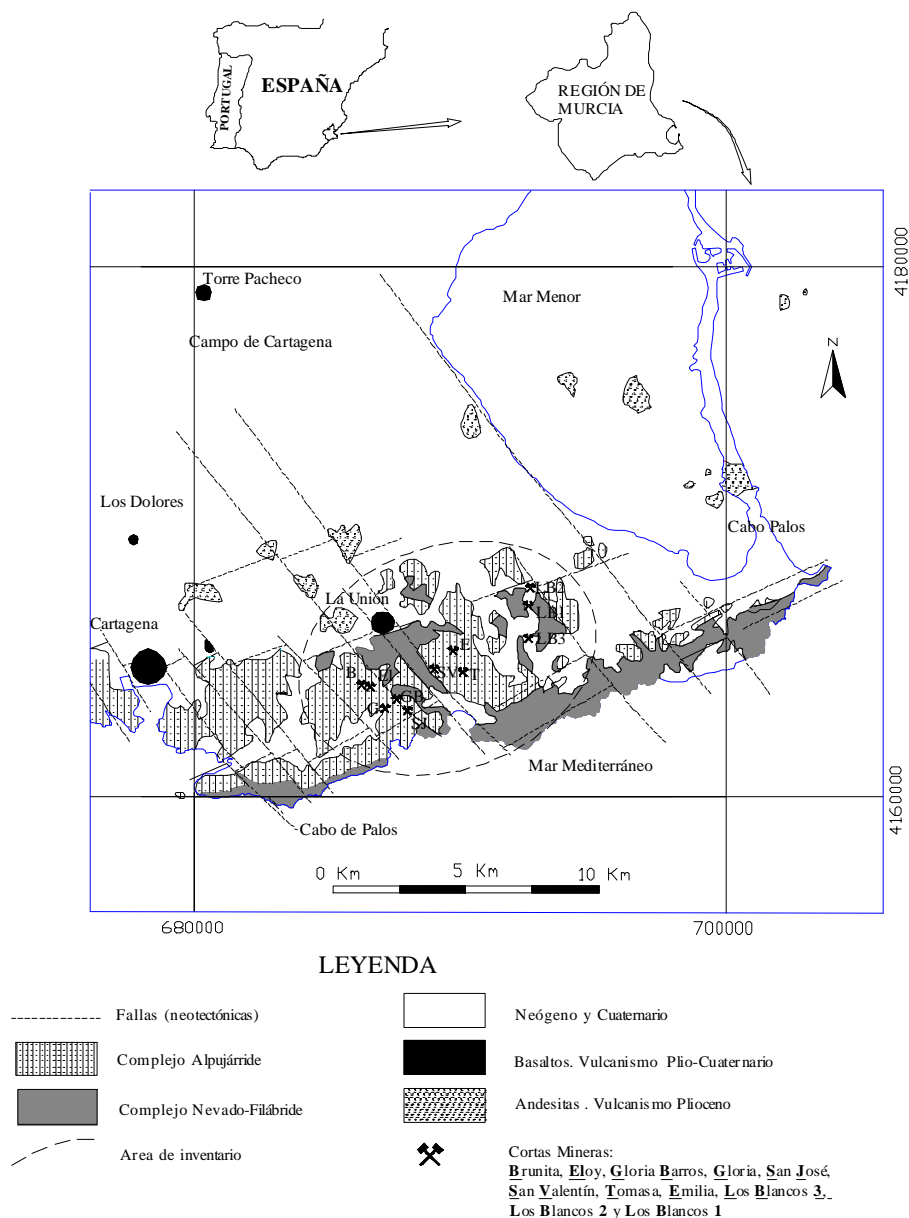


Figura 2.18. Esquema geológico-estructural de la Sierra de Cartagena-La Unión (Modificado de Manteca et al., 2004).

Geológicamente está constituida por una serie de mantos de cabalgamiento superpuestos, de edad Alpina, afectados por un metamorfismo decreciente de muro a techo. Este edificio

de mantos, tras una importante fase de erosión, fue recubierto por una serie neógena transgresiva y tardiorogénica. En el Neógeno, hay una importante fase de fracturación, seguida de fenómenos volcánicos y levantamiento de la Sierra, para continuar con el desmantelamiento erosivo pre-actual (Plio-Cuaternario) (Manteca y Ovejero, 1992).

Unidades lito-estructurales

En este apartado se analiza la secuencia de materiales geológicos presentes en el área de estudio, según Manteca y Ovejero, (1992).

De muro a techo se distinguen las siguientes unidades principales (Figura 2.19):

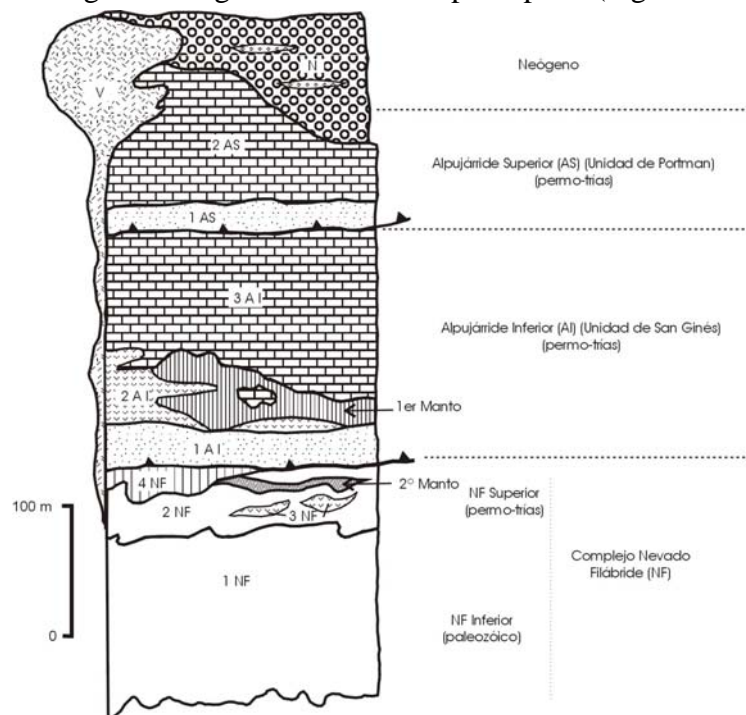


Figura 2.19. Columna lito-estructural simplificada de la zona central de la Sierra de Cartagena-La Unión (Manteca y Ovejero, 1992). **V:** dacitas y andesitas. **N:** areniscas y conglomerados. **2AS:** dolomías y calizas. **1AS:** cuarcitas y filitas. **3AI:** calizas y dolomías. **2AI:** doleritas subvolcánicas. **1AI:** filitas y cuarcitas. **4NF:** mármoles. **3NF:** metabasitas. **2NF:** esquistos y cuarcitas. **1NF:** esquistos grafitosos y cuarcitas.

2.8.1.1. Complejo Nevado-Filábride (CNF)

Aflora en la zona meridional, en la parte Sur de la cadena montañosa costera que se extiende desde Escombreras hasta Cabo de Palos, con un mayor desarrollo al Este de Portman. También aflora en la Zona Central de la Sierra Minera, principalmente en el horst de Las Lajas, así como en el sector situado al Norte del Sancti Espíritu, Sur de corta Emilia (horst de Coto Azul), al Sur y Este del Llano del Beal en el área de Coto Ponce, Los Blancos y Atamaría. Presenta un metamorfismo epi-mesozonal. En él se distinguen:

2.8.1.1.1. Nevado-Filábride Inferior (NFI)

Serie basal, constituida por micaesquistos grafitosos negros, cuarcitas grises y esquistos cuarcíticos (Fotos 2.1 a 2.4), siendo estos dos últimos materiales predominantes en la parte superior de la serie. Los minerales mayoritarios en los micaesquistos son cuarzo, moscovita y grafito y localmente gran abundancia de granates. Su edad es Paleozoico impreciso; por su litología se le podría comparar con las facies ampelíticas del Silúrico, o con la facies Culm del Carbonífero inferior (Manteca y Ovejero, 1992). Su espesor se estima en base a los afloramientos que es mayor de 500 m. En términos mineros locales se le conoce con el nombre de "muro". Aflora en el sector costero entre Portman y Cabo de Palos, en la parte central de la sierra en la Cuesta de las Lajas (horst de Las Lajas), zona norte del Sancti Espíritus, sur de Emilia, y al sur y este del Llano del Beal (Ponce, horst de Atamaría, El Coto y Los Blancos).



Foto 2.1. Esquistos grafitosos del Paleozoico. Cerro al norte de El Coto.

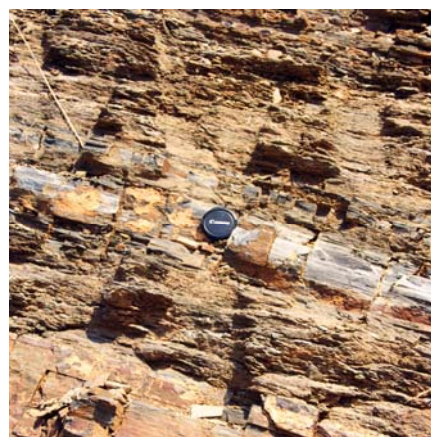


Foto 2.2. Detalle de la Foto anterior. Se pueden apreciar intercalaciones de cuarcitas en los esquistos.



Foto 2.3. Contacto entre los esquistos grafitosos del Paleozoico (izquierda) y esquistos claros y cuarcitas blancas del Permo-Triás. Cerro al norte de El Coto.

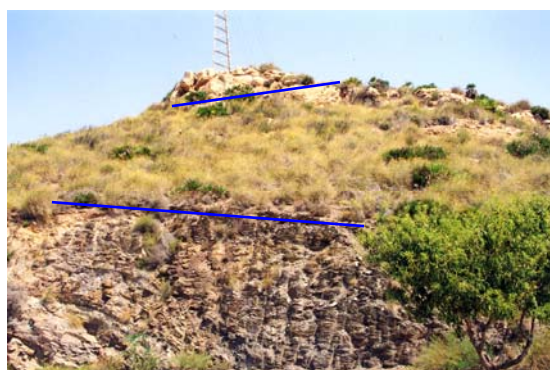


Foto 2.4. Esquistos grafitosos del Paleozoico, en la base del cerro, y mármoles del Nevado-Filábride superior, en la cima. Entre ambos materiales, cubiertos por la vegetación, están los esquistos claros y cuarcitas.

2.8.1.1.2. Nevado-Filábride Superior (NFS)

Constituida por micaesquistos plateados, cuarcitas blancas, rocas verdes y mármoles. En la zona central de la sierra, sobre los mármoles aparecen esquistos claros, cloritoesquistos y sericitoesquistos (en términos mineros locales se denominan esquistos de "techo"). Mineralógicamente se puede resaltar en esta serie la abundancia de albita, que localmente permite clasificar a la roca como esquistos albítico o gneis albítico. Los mármoles presentan generalmente impurezas y pueden contener los minerales siguientes: cuarzo, moscovita, plagioclasa, biotita, magnetita, y localmente epidota. En todos los casos se trata de mármoles calcícticos, nunca dolomíticos (Fotos 2.5 a 2.10).



Foto 2.5. Sill de roca volcánica (metabasitas) caolinizada, dentro de los esquistos grafitosos del Paleozoico. Cerro al norte de El Coto.



Foto 2.6. Mármoles fajeados Nevado-Filábrides, donde se aprecian los micropliegues y la fracturación.



Foto 2.7. Detalle de los mármoles Nevado-Filábrides intensamente plegados y fracturados. Falda norte de la sierra litoral, próxima a las Cenizas (Portman).



Foto 2.8. Mármoles fajeados, con fracturas abiertas. Falda norte de la sierra litoral, próximo a las Cenizas (Portman).



Foto 2.9. Cuarcitas blancas del Nevado Filábride superior, con fuerte buzamiento hacia el sur. Falda norte de la sierra litoral, al sur de las urbanizaciones del campo de golf de Atamaría (Los Belones).



Foto 2.10. Detalle de la foto anterior, que muestra la intensa fracturación que presentan las cuarcitas blancas.

Es de señalar que, mientras en la zona sur, sierra litoral, los mármoles se apoyan sobre cuarcitas y esquistos claros, en la zona central y septentrional lo suelen hacer directamente sobre los esquistos grafitosos del Nevado-Filábride inferior.

Las rocas verdes comprenden, tanto cuerpos masivos de metabasitas (interpretadas como ortoanfibolitas), como esquistos cloríticos, a menudo con albita (interpretados como piroclastos). El espesor de esta unidad es muy variable y difícil de precisar debido al plegamiento, aunque se estima que es inferior a los 100 metros considerando los afloramientos. La edad asignada a la serie esquistoso-cuarcítica es del Permo-Werfeniense, y Triásico para los mármoles (Ovejero et al., 1976).

Ambos conjuntos se presentan concordantes en relación con la esquistosidad, aunque localmente entre los mármoles y los esquistos y cuarcitas subyacentes, aparecen discordancias de origen tectónico, a causa del plegamiento diferencial de los materiales, como se puede apreciar en la ventana tectónica del collado de Atamaría (Manteca y Ovejero, 1992).

2.8.1.2. Complejo Alpujárride (CA)

En discordancia sobre el Nevado-Filábride se halla el complejo Alpujárride, poco o nada metamórfico. En él se distinguen hasta tres mantos de cabalgamiento superpuestos. Cada unidad o manto, consta de una base detrítica epimetamórfica, que pasa verticalmente a una serie carbonatada. Podemos distinguir de muro a techo.

2.8.1.2.1. Unidad Alpujárride Inferior (UAI) o unidad de San Ginés

Consta de una base de rocas detríticas epi-metamórficas, filitas y cuarcitas, de tonos grises, verdosos y violeta, atribuibles al Permotriás, y una parte superior carbonatada, atribuida al Triás medio (Ladiniense) (Ovejero et al., 1976).

En el paquete carbonatado, y preferentemente en su base, aparecen frecuentes cuerpos intrusivos de doleritas o diabasas, en forma de diques y también de sills subconcordantes, que presentan su máximo desarrollo en la zona central de la sierra (área de las cortas mineras San Valentín y Emilia), donde estas rocas presentan espesores del orden del centenar de metros. Estos cuerpos de rocas intrusivas no presentan las correspondientes raíces, por haber viajado junto con la unidad alpujárride portadora.

El espesor máximo para la serie carbonatada de esta unidad es de 250 metros, y se encuentra en la zona norte de la Sierra, principalmente en las áreas de la corta Emilia y del Cabezo de San Ginés de la Jara. Esta serie carbonatada comprende calizas y dolomías, con rápidos cambios laterales de unas a otras (Fotos 2.11 y 2.12).



Foto 2.11. Dolomías marrones alpujárrides de la Unidad de San Ginés. Cerro del Puntal.



Foto 2.12. Detalle de la foto anterior, donde se puede apreciar la karstificación y porosidad secundaria de las dolomías de San Ginés. Cerro del Puntal.

2.8.1.2.2. Unidad Alpujárride Superior (UAS) o unidad de Portman

Esta unidad está superpuesta a la anterior y compuesta por términos análogos. Consta de una base detrítica, de tonos chocolate a rojo vino y una parte superior carbonatada, predominantemente dolomítica, asignables igualmente al Permotriás y Triás medio respectivamente (Fotos 2.13 a 2.16). A diferencia de la anterior, en esta unidad no aparecen doleritas. El espesor máximo que alcanza la serie carbonatada es de unos 200 metros. El de la serie detrítica inferior es sumamente variable por efecto del plegamiento, pudiendo estimarse un espesor medio de 40 metros.

En la vertiente norte de la sierra prácticamente no se encuentra esta unidad, debido a que ha sido desmantelada por la erosión, mientras que hacia el sur, va aumentando progresivamente su espesor. En la vertiente meridional de la sierra, esta unidad bisela a la de San Ginés infrayacente, llegando a apoyarse directamente sobre el Nevado-Filábride. En el tramo carbonatado predominan las dolomías, frecuentemente con facies de tipo "franciscana" o dolomía cebrada. En el tramo detrítico inferior además de las filitas, abundan las cuarcitas de tonos rosados y blancos (Manteca y Ovejero, 1992).



Foto 2.13. Materiales alpujárrides de la unidad de Portman, con filitas violeta en la base del cerro y dolomías crema al techo. Cerros al sur de las urbanizaciones del Campo de Golf de Atamaría (Los Belones).



Foto 2.14. Relieve correspondiente a la Unidad de Portman. Contacto entre filitas violeta a la base del cerro, y dolomías grises en la parte alta. Collado de la carretera de Atamaría a Portman.



Foto 2.15. Dolomías grises "cebradas" de la Unidad de Portman. Cerro junto al club Campo de Golf. Atamaría (Los Belones-Cartagena).



Foto 2.16. Detalle de las dolomías grises "cebradas" de la foto anterior.

2.8.1.2.3. Unidad de El Gorguel

Se superpone a la unidad de Portman en la zona de El Gorguel. Su presencia se reduce a pequeños klippen, por haber sido desmantelada por la erosión. Su base detrítica, apenas afectada por el metamorfismo, consta de pelitas micáceas y areniscas-cuarcitas de color rojo a violeta. El tramo carbonatado, calcáreo-dolomítico, no pasa de los 30 metros de espesor.

La superficie de cabalgamiento del complejo Alpujárride, recorta las estructuras plegadas de las unidades Nevado-Filábrides. En la base del Alpujárride, inmediatamente encima de la superficie de cabalgamiento, aparece un nivel de esquistos grafitosos, generalmente de poco espesor, que puede alcanzar un máximo de unos 25 metros. Es el llamado "falso muro" por los mineros, que se puede observar en numerosos puntos de la Sierra Minera, por ejemplo en el talud Este de la corta Gloria. Estos esquistos grafitosos aparecen en la

base de la unidad cabalgante, sea esta el Alpujárride inferior, como ocurre en las zonas norte y central de la sierra, o el Alpujárride superior, en la vertiente sur. Es decir no ocupan una posición estratigráfica, sino tectónica (Manteca y Ovejero, 1992).

Posteriormente García Tortosa et al., (2000) consideran que esta unidad, denominada por los autores como “Los Simones”, pertenece al complejo Maláguide.

2.8.1.3. Serie Neógena

Previa a la transgresión marina Miocena, y tras la fase de plegamiento principal, el edificio orogénico se levantó y sufrió una larga etapa de erosión, alcanzando ésta diferentes niveles sobre la columna estratigráfica. De ahí que tras la inmersión en el Mioceno, los correspondientes sedimentos aparezcan depositados sobre muy diferentes substratos. Bien sobre el Nevado-Filábride inferior, el Nevado-Filábride superior, el Alpujárride inferior o el superior (Manteca y Ovejero, 1992).

Los sedimentos marinos, datados como Serravalliense, están representados principalmente por rocas pelíticas (argilitas y margas), con intercalaciones de areniscas y algunos niveles de conglomerados y turbiditas. En ciertas zonas (Coto Ponce) las pelitas presentan un alto contenido en materia carbonosa, siendo relativamente frecuentes los restos vegetales lignificados (Manteca y Ovejero, 1992).

El posterior levantamiento de la cuenca, y la compartimentación en bloques debido a la etapa de distensión, permitió la erosión de una gran parte de estos depósitos, que sólo quedarán bien preservados en las zonas de graben (Manteca y Ovejero, 1992).

Así, donde mejor representado está el mioceno es al sur y sureste del Llano del Beal (Fotos 2.17 a 2.20). Los mayores espesores, unos 200 metros, se corresponden con una fosa tectónica normal, delimitada por el sistema regional de fallas N130E (Manteca y Ovejero, 1992).



Foto 2.17. Limolitas y argilitas del Mioceno. Sierra de Ponce (Llano del Beal).



Foto 2.18. Conglomerados miocenos, parcialmente mineralizados. Sierra de Ponce (Llano del Beal).



Foto 2.19. Castillete y casa de máquinas del pozo de extracción de la mina San Ignacio, en materiales del mioceno, en la sierra de Ponce (Llano del Beal).



Foto 2.20. Materiales del Mioceno en la sierra de Ponce. Las rocas que resaltan son conglomerados, y el resto son argilitas y limolitas principalmente.

En el área al Este y Sur de la corta Brunita, el Mioceno se conserva con un cierto desarrollo, con espesores mucho menores que los del área de El Llano, inferiores a los 100 metros. Al Oeste de la corta Brunita, conglomerados de base del Mioceno aparecen implicados en escamas tectónicas, cabalgados por filitas pérmicas y calizas triásicas.

Al Norte de la Sierra Minera, los espesores del Mioceno aumentan notablemente, alcanzándose rápidamente valores del orden de los 300 metros bajo la llanura de La Unión. En el Cabezo Rajao presenta un espesor entre 150 y 200 metros. Este rápido aumento de espesor parece confirmar la presencia de una falla, la llamada falla de Cartagena-La Unión, delimitando el borde septentrional de la sierra, con rumbo N70E (Manteca y García, 2001).

2.8.1.4. Cuaternario

Ocupa las depresiones, concretamente los valles de Escombreras, Alumbres, el Gorguel, Portman, Atamaría-campo de golf. Litológicamente está constituido por conglomerados, gravas, arcillas y caliches. Su espesor es muy variable, puede llegar hasta los 40 metros (Foto 2.21). En la terminación occidental del valle del Gorguel, próximo al Mar Mediterráneo, aparecen areniscas del Tirreniense (Lillo Carpio y Rodríguez Estrella, 1996).



Foto 2.21. Costra calcárea de evapotranspiración (caliche) del Cuaternario. Falda Sur de la Sierra de Ponce.

2.8.2. MAGMATISMO

Corresponde a dos etapas de actividad magmática. Hay que diferenciar en primer lugar, un magmatismo preorogénico de edad imprecisa, probablemente tarditriásica o jurásica, y otro postorogénico de edad neógena postmioceno (Oen, et al., 1975b).

El magmatismo preorogénico, de carácter básico, está representado por las doleritas de la unidad de San Ginés, así como por las metabasitas del Nevado-Filábride superior. Las doleritas se presentan preferentemente, como cuerpos intrusivos subconcordantes (sills), y en otros casos como diques, situándose principalmente a la base del paquete carbonatado. Las metabasitas aparecen como cuerpos concordantes en el Nevado-Filábride superior, sin otras características concretas que permitan dilucidar su emplazamiento efusivo o intrusivo.

El magmatismo postorogénico (Neógeno) está representado por rocas subvolcánicas calcoalcalinas (andesitas, riocitas, riolitas etc.) y por rocas extrusivas (basaltos). Estas vulcanitas afloran principalmente en la llanura al norte de la sierra, donde constituyen relieves diferenciales o "Cabezos", alineados según un eje mayor N70E. En la vertiente norte de la sierra, al oeste y sur de La Unión, aparecen diversos diques y domos, localmente acompañados de "brecha pipes", orientados según la dirección estructural N130E, intersectando todos los niveles lito-estructurales, incluido el Mioceno. En dicha zona minera, las dacitas y andesitas están afectadas por una fuerte alteración hidrotermal. Estos sistemas de diques afloran sobre todo en la zona axial de la sierra, Cuesta de La Lajas y La Crisoleja, pero también existen tanto al oeste (mina La Parreta de Alumbres) como al este (parajes de El Descargador, mina Cielo, Monte Francis, etc.) de dicha zona, aunque en superficie apenas se manifiesten (Manteca y Ovejero, 1992). Se han asignado edades de 7 a 11 millones de años (Mioceno: Serravaliense-Tortonense) para las rocas dacíticas y andesíticas y de 2,65 m.a. (Plioceno) para las basálticas (Bellon, 1976 y Bellon et al., 1983).

2.8.3. TECTÓNICA

Los materiales Nevado-Filábrides presentan dos fases de deformación: la primera dio lugar a un plegamiento isoclinal, localmente tumbado, acompañado de esquistosidad de flujo con frecuentes transposiciones tectónicas, presentando una dirección comprendida entre N70E y N120E. La segunda fase, de dirección norteada y vergencia oeste, originó pliegues isoclinales ocasionales y una crenulación de la esquistosidad. Ambas deformaciones serían Alpinas. No se han observado estructuras pre-Alpinas.

Los materiales Alpujárrides presentan un plegamiento diferencial, muy intenso en las filitas, y más suave en los materiales carbonatados, en discordancia con aquellas. Presentan también dos fases de deformación superpuestas, una de dirección N100-120E y otra posterior N20-40E. Esta última es posterior al emplazamiento principal de los mantos, habiendo dado lugar a escamas y estructuras cabalgantes menores, implicando incluso al Mioceno. En la zona entre Alumbres y la corta Brunita, aparecen algunas escamas tectónicas en las que el Mioceno está montado por materiales alpujárrides. Ello indicaría que la actividad orogénica persistía probablemente hasta el Tortoniense. La misma conclusión parece extraerse en la zona al sur del Llano del Beal (corta Sultana) donde el contacto basal del Mioceno sobre el substrato Bético es mecánico, indicando una tectónica tangencial tardía (Manteca y Ovejero, 1992).

Tras el proceso de emplazamiento de los mantos, comprendido entre el Eoceno y el Mioceno medio, se dio una fase de distensión, con formación de los sistemas de fallas NNW-SSE y NE-SW, de valores modales N130E y N70E respectivamente. Estas fallas tuvieron una importante reactivación tras el Mioceno medio, determinando, junto con un bombeamiento antiformal, la actual configuración de la Sierra y su disposición en horsts y fosas tectónicas (Figura 2.28). Es interesante observar que, zonas que inicialmente funcionaron como horst y propiciaron un intenso desmantelamiento erosivo pre-Serravaliense, posteriormente lo hicieron como grabens, como es el caso de la fosa de Sultana al sur del Llano del Beal, preservando de la erosión posterior a los sedimentos del Mioceno medio (Serravalienses).

Este sistema de fracturación fue aprovechado posteriormente por el magmatismo Neógeno, de manera que los afloramientos magmáticos se alinean según las dos direcciones principales. Se ha sugerido incluso que el bombeamiento de la Sierra se deba al emplazamiento de un enorme domo subvolcánico, que supuestamente subyacería a la sierra en profundidad (IGME, 1995a).

La alineación Alumbres, La Unión, Estrecho de San Ginés, que marca un primer límite septentrional de la Sierra Minera, corresponde probablemente a una falla de cizalla del sistema N70E. Paralelamente a la misma y un poco más al norte, la presencia de otro

importante desgarre viene señalada por la alineación de cabezos volcánicos riódacíticos (Beaza, Roche, etc.) y marca el límite definitivo (Manteca y García, 2001).

Sistemas de fracturación

En el conjunto de la Sierra Minera se distinguen dos sistemas de fracturación principales.

* Sistema N130E: es el principal de ellos, con una alta densidad de fracturación, aunque no siempre estas fallas son patentes, dado que en los materiales filíticos, muy plásticos, no tienen un reflejo apreciable y su expresión cartográfica no es buena. Las principales fallas de este sistema aparecen entre La Unión y Portman y definen un importante pasillo estructural que determina, entre otras cosas, la configuración del horst de Las Lajas, la formación de la Bahía de Portman y el desgarre dextral del litoral por Cabo Negrete (ITGE, 1996). Las principales fallas de este sector se denominan San José, Las Lajas, Remunerada y Belleza. En la zona de Atamaría se distinguen las fallas Atamaría, El Bosque, El Lírio, Diccionario, Los Blancos, Las Mulas y La Fuente (Foto 2.22), cuyas longitudes cartografiadas alcanzan hasta los 20 km.



Foto 2.22. Plano de falla en materiales del Mioceno. Se trata de una fractura mineralizada, de dirección N-130°.

La cartografía de los filones mineralizados revela con claridad, que su principal distribución se localiza en la intersección de las fracturas con los mármoles, (Figura 2.25). Este hecho proporciona una visión complementaria de la importancia de la fracturación en el control de la mineralización.

* Sistema N60-70E: las fracturas de éste, al menos en su expresión cartográfica, presentan una menor continuidad, con longitudes muy inferiores a las del sistema N130E, debido en parte a que son anteriores y están desplazadas por éstas. A su vez la cartografía de filones no muestra la presencia de éstos en esta dirección; tal vez el hecho de tratarse de fallas de cizalla o desgarres ha determinado que no se desarrollen espacios abiertos en dicha dirección, hábiles para la circulación y precipitación de sustancias minerales.

La principal falla de este sistema sería la llamada falla de Cartagena-La Unión (deducida, porque por sondeos, fotos aéreas o sísmica no es visible), anteriormente citada, que corresponde a la alineación Cartagena, Alumbres, La Unión, Estrecho de San Ginés. El valle de Escombreras-El Gorguel, por su orientación, corresponde también probablemente a una falla N70E.

El valle del Gorguel se desarrolla a lo largo de la falla del mismo nombre, de rumbo N55-60E, desde la refinería de Escombreras hasta el cabezo del Pino, con una longitud de unos 5 km. El valle de Atamaría, donde se encuentra el Club de Golf de La Manga del Mar Menor, se desarrolla también a lo largo de una falla de este sistema N60E, en especial la denominada falla de Portman-Campo de Golf y la falla Carretera (Rodríguez Estrella et al., 2000a).

Durante el Cuaternario tiene lugar una etapa de compresión, de dirección casi N-S, que afecta a los caliches mediante fallas de desgarre (Rodríguez Estrella, 1986 y Rodríguez Estrella et al., 1986).

2.8.4. NEOTECTÓNICA Y SISMICIDAD

Se consideran neotectónicos todos aquellos movimientos y estructuras consecuentes que han tenido lugar desde el Mioceno superior (inclusive), en concreto desde el límite Serravaliense-Tortonense (hace 11 ó 12 millones de años). Esta fecha marca el inicio de un régimen de compresión N-S, que trajo consigo el bloqueo de las fallas dextrógiras y el rejuego de éstas como levógiras (y viceversa).

En la Región de Murcia existe una gran convergencia entre neotectónica y fallas de ámbito regional con una serie de fenómenos geológicos como sedimentación (cuencas terciarias y cuaternarias), vulcanismo, geotermismo y sismicidad. Estos hechos se producen fundamentalmente en el tercio meridional de la Región, que es donde se ubica la zona de estudio en que se centra este trabajo.

En la Figura 2.20. (ITGE, 1994d), pueden apreciarse las fracturas de carácter neotectónico, además de afloramientos volcánicos, diapiros triásicos y puntos de agua termal.

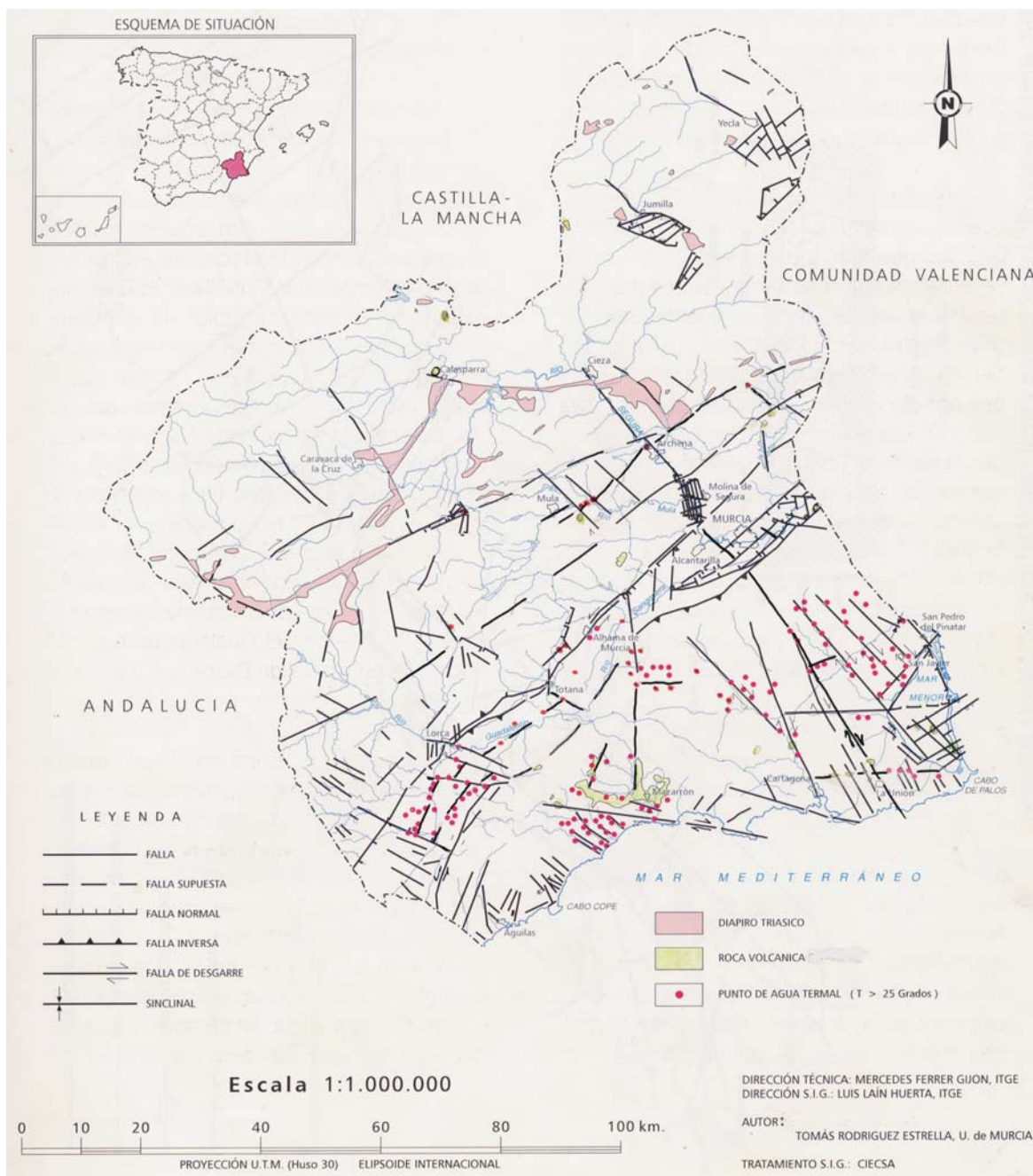


Figura 2.20. Mapa Neotectónico de la Región de Murcia. (ITGE, 1994d).

2.8.4.1. Sismotectónica de la Región de Murcia

Este apartado se ha tomado fundamentalmente del "Atlas Inventario de Riesgos Naturales" de la C.A.R.M. (ITGE, 1995a), pues sólo se ha modificado ligeramente y actualizado con los últimos movimientos sísmicos, ocurridos desde 1994, de Torres de Cotillas, Ramonete y Mula. Hay una relación muy directa entre sismicidad y fallas profundas, en especial en aquellas zonas de intersecciones tectónicas.

Los epicentros sísmicos se encuentran en ciertas zonas y muchas veces están alineados. A estos lugares se denominan zonas sismotectónicas y se destacan las siguientes: 1- Falla de

Alhama de Murcia (F.A.M.), 2- Falla de la Vega Alta del Río Segura – La Unión, 3- Falla Sierra de la Puerta, 4- Falla Norbética (F.N.B.), 5- Falla de Jumilla-Diapiro de la Rosa.

Otras zonas sismotectónicas de menor relevancia, aunque dignas de tener en cuenta son: 1- Falla de Crevillente (F.C.) especialmente en su segmento oriental, entre el cruce con la falla de la Vega Alta del Segura y con la de Puebla de Mula, 2- Zona del Oeste de Caravaca, concretamente en la falla de la Rambla de Tarragoya-Río Quípar, 3- Falla de Cieza-Diapiro de la Rosa, 4- Zona de litoral.

En la Figura 2.21 pueden verse todos los epicentros sísmicos, correspondientes a terremotos tanto históricos como instrumentales, ocurridos en la Región de Murcia, así como las alineaciones sismotectónicas más importantes (Ibargüen y Rodríguez Estrella, 1996).

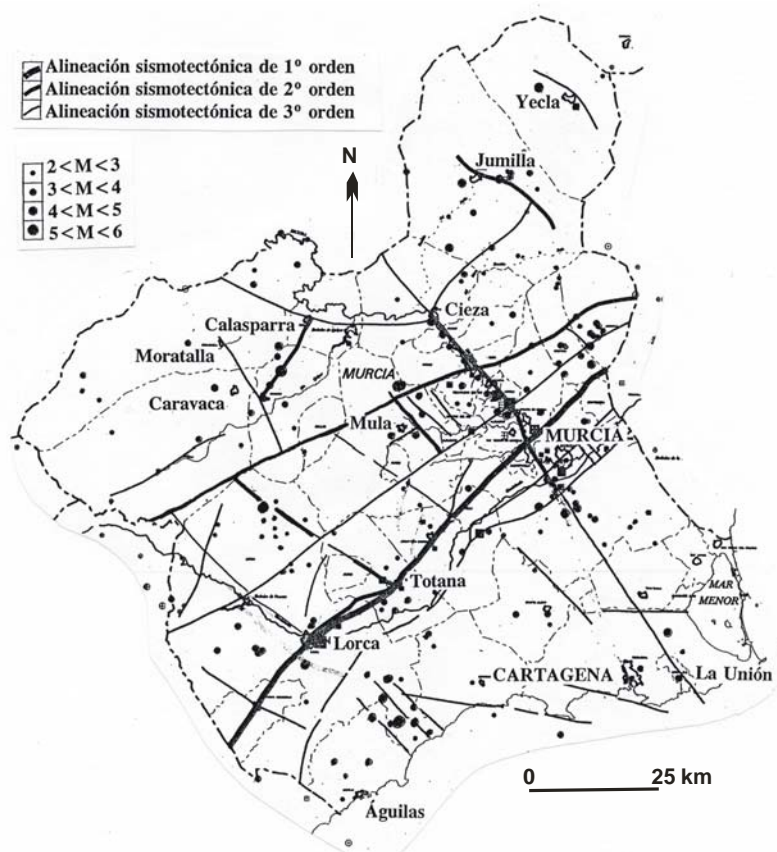


Figura 2.21. Mapa sismotectónico de la Región de Murcia (Ibargüen y Rodríguez Estrella, 1996).

2.8.4.2. Sismotectónica de la zona de estudio

De las fallas activas relacionadas, merece especial atención la de la Vega Alta del río Segura-La Unión, de dirección N140E y carácter direccional dextral, por pasar su traza en las proximidades de un área minera hundida (ver Capítulo 8), en la zona del Cabezo Rajao (Rodríguez Estrella et al., 2000c).

De esta falla, en su tramo de Vega Alta del Segura, ya se conocía hace tiempo la actividad reciente y actual de la misma (Rodríguez Estrella, 1979), por ser numerosos los epicentros sísmicos localizados en su traza, algunos de cierta importancia, como los sucedidos en 1911 de intensidad VIII; también se sabía que dicha falla continuaba hacia el Sur por el Campo de Cartagena, a juzgar por los abundantes epicentros que había en el Norte de la depresión (Rodríguez Estrella, 1993). Lo que se desconocía, es que dicha falla pudiera prolongarse hasta La Unión, conectada con la falla de “Las Lajas”, incluso condicionar la geomorfología de la costa en el cabo de Punta Negra de Portman (Rodríguez et al., 2000c).

Como consecuencia de las investigaciones, se ha podido ver que la falla de “Las Lajas” es la misma que la falla de “La Cierva” y que pasa prácticamente por la zona hundida. Por otro lado, se ha constatado que dicho gran accidente, en el segmento más meridional (zona de estudio), también ha tenido actividad sísmica en los últimos tiempos (Rodríguez et al., 2000c).

En efecto, en la Figura 2.22 puede verse el mapa de isosistas, (I.T.G.E. 1993b) del sismo ocurrido el 1-11-1960 de intensidad V, con epicentro en el Oeste de la Unión.

De su observación se aprecia que las isosistas describen dos alargamientos diferenciados según direcciones N130-140E y también N60-70E. El primero se situaría en la traza de la falla de la “Vega Alta del Segura-La Unión” y el segundo aproximadamente en la de la falla de “Cartagena-La Unión”.

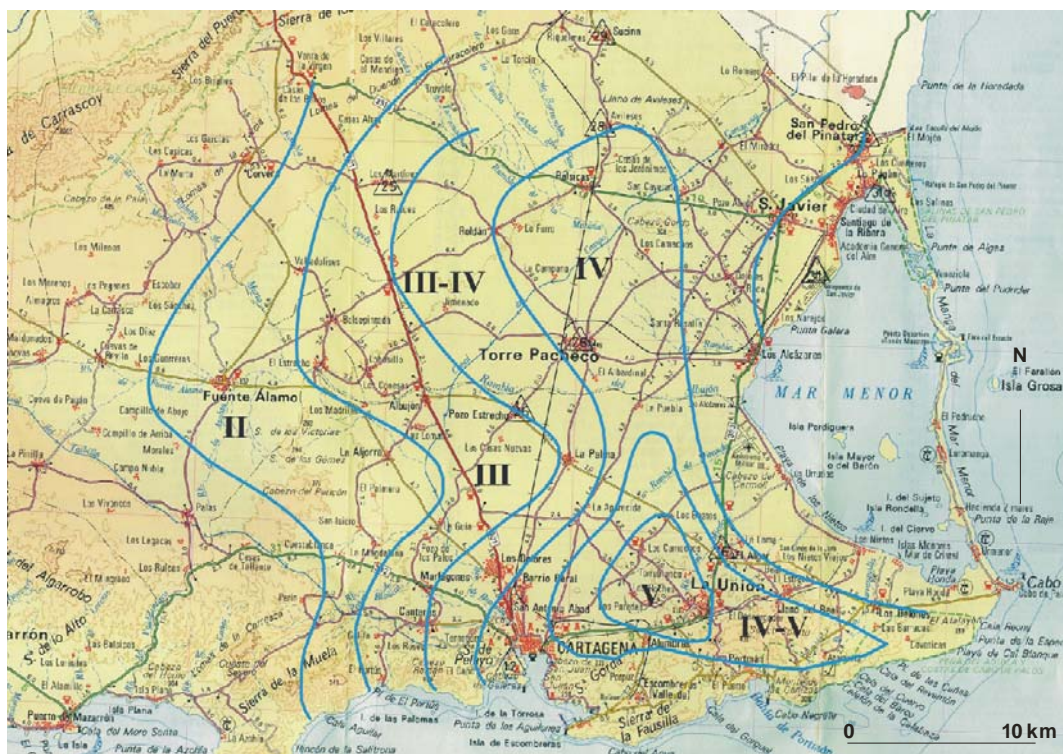


Figura 2.22. Mapa de isosistas del sismo 1-11-1960. Datos del IGN y elaboración propia (Rodríguez et al., 1999).

Pero el argumento más contundente de que dicha falla es activa en la actualidad (en la zona de hundimiento) y que ha debido tener una influencia decisiva en el desarrollo de los acontecimientos ocurridos en La Unión, es que el día 2 de mayo de 1998 tuvo lugar un seísmo de magnitud 2,3 (el mismo día en que se empezaron a observar grietas y hundimientos del terreno) a unos 5 Km. al ONO de Torre Pacheco, de coordenadas: longitud $1^{\circ} 11' W$ y latitud $37^{\circ} 46' 2'' N$.; el epicentro se sitúa en la traza de la falla, alineado con el del sismo del 1-11-1960 y con otros muchos más (Rodríguez et al., 2000c).

2.8.4.3. Sismotectónica reciente y actual

La tectónica reciente de la Región de Murcia, sobre todo la existente en las Vegas del Segura, ha sido estudiada por Rodríguez Estrella (1986) y Rodríguez Estrella et al., (1999), en donde ponen de manifiesto que el propio río Segura se adapta a fracturas neotectónicas de dirección N140-160E (dextral) y N60-70E (inverso-direccional sinextral). También en la costa murciana existe una tectónica reciente, que ha condicionado la morfología del litoral y que viene definida por fallas de desgarre N140-160E y por movimientos epirogénicos (Rodríguez Estrella y Lillo Carpio, 1986 y 1992). Esta ha sido estudiada por Rodríguez Estrella y Almoguera Lucena (1986), Rodríguez Estrella y Mancheño (1993) en la Falla de Alhama, al comprobar cómo el movimiento de ésta afecta a urbanizaciones, entre las que figuran el Acueducto del Tránsito Tajo-Segura, los Túneles de Lorca y los Barrios Altos de Lorca. De la observación de las fracturas o grietas se deduce que responden a una neotectónica actual compresiva, cuyos esfuerzos tienen predominantemente una dirección casi N-S, pero también, aunque menos frecuente, una aproximada O-E.

Respecto a la sismotectónica reciente y actual hay que decir que los últimos terremotos importantes sucedidos en la Región de Murcia presentan un mecanismo focal de N140E con carácter dextral. En efecto, el acaecido en Las Torres de Cotillas, el 26-11-95, de magnitud 4.1 e intensidad V-VI, está relacionado con la falla del Segura (Vega Alta) de claro carácter dextrógiro (Ibargüen y Rodríguez Estrella, 1996). El terremoto de Ramonete del 2-6-96, de magnitud 4,5 e intensidad VI, está vinculado a fallas de N140E, que condicionan las ramblas del lugar, que presentan un desgarre dextrorsum (Ibargüen y Rodríguez Estrella, 1996). Por último, el terremoto de Mula del 2-2-99, de magnitud 5 e intensidad VI, se relaciona con la falla de la Puebla de Mula (en la intersección con la de Crevillente) que presenta un carácter dextral y normal, dado que condiciona la depresión terciaria de Mula, por el Oeste (Ibargüen y Rodríguez Estrella, 1999).

2.9. YACIMIENTOS MINERALES

En la parte central de la Sierra de Cartagena-La Unión se encuentra la zona minera, que ocupa una superficie rectangular, alargada en dirección Noreste - Suroeste, de unos 10 x 5 km. Esta zona encerraba la mayor acumulación de Pb-Zn de las Béticas, y una de las principales de la Península Ibérica (Figura 2.23).

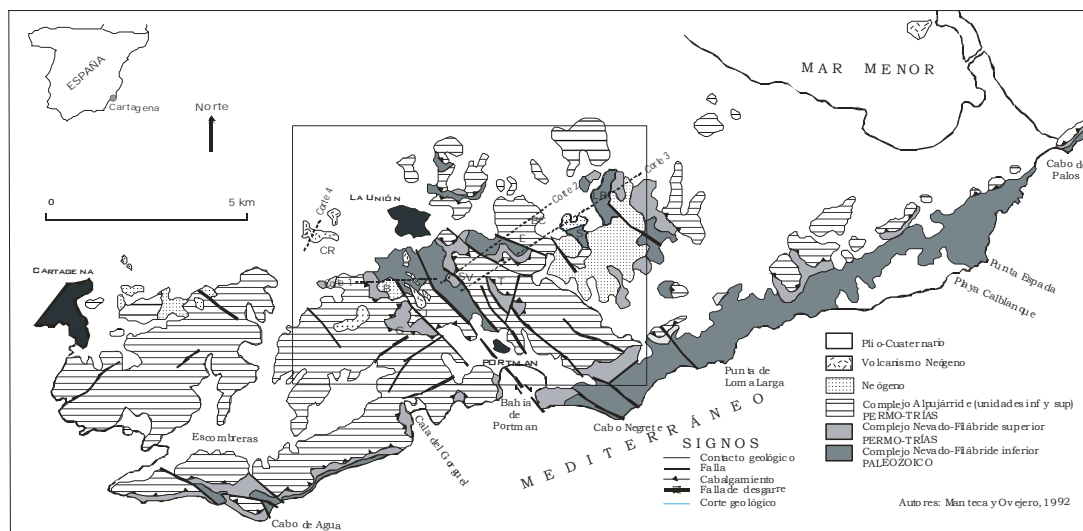


Figura 2.23. Esquema geológico de la Sierra de Cartagena-La Unión, con indicación de las iniciales de las cortas y cortes geológicos del 1 al 4 (Manteca y Ovejero, 1992).

Son muchos los trabajos publicados sobre la geología y los depósitos minerales de este distrito minero, desde finales del siglo XIX hasta la actualidad, entre los que caben destacar los de Bravo Villasante, (1912); Guardiola, (1927); Friedrich (1962, 1964), Urban (1968); Pavillon (1969, 72); Alabert (1973); Espinosa et al., (1974); Oen et al., (1975); Ovejero et al., (1976); Kager (1980); Manteca y Ovejero (1992).

2.9.1. TIPOLOGÍA DE LOS YACIMIENTOS METÁLICOS

Según la morfología del cuerpo mineralizado, Manteca y Ovejero (1992), distinguen cuatro tipos de yacimientos (Figura 2.24), que ordenados según su orden de magnitud, son los siguientes:

1. Los "mantos".
2. Diseminaciones en el mioceno.
3. Stockworks y filones asociados a las vulcanitas.
4. Estructuras filonianas s.l. y reticulaciones en el paleozoico.

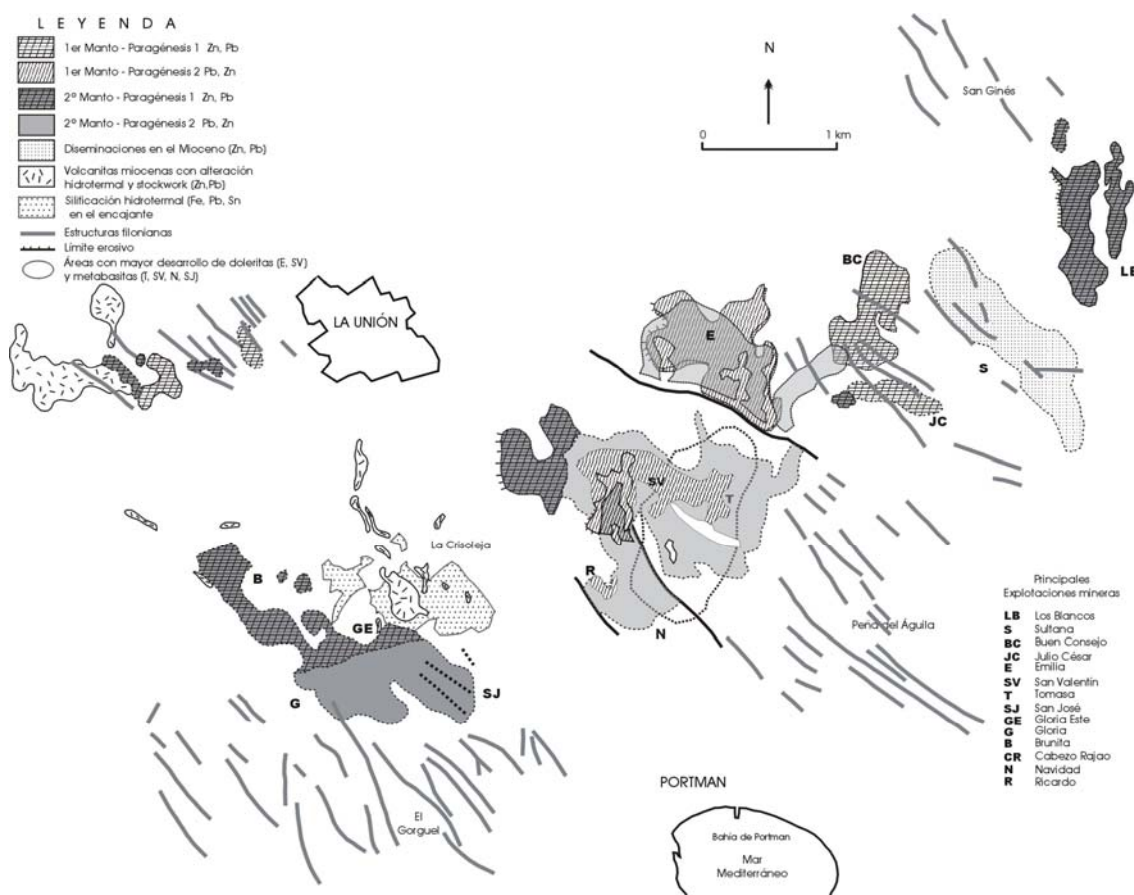


Figura 2.24. Distribución de los depósitos mineralizados en la Sierra de Cartagena-La Unión (Manteca y Ovejero, 1992).

2.9.1.1. Los "mantos"

Término minero local, empleado para referirse a las mineralizaciones estratiformes; han constituido el principal recurso mineral de la sierra minera (187 kt de todo uno) y en ellos se han desarrollado, a partir del año 1957, las explotaciones a cielo abierto o cortas. Según su posición estratigráfica se distinguen: "1^{er} manto" y "2º manto".

"1^{er} manto" o manto superior

Se encuentra en el complejo Alpujárride inferior (unidad de San Ginés), a la base del paquete carbonatado, asociado a las doleritas. Espacialmente se ha encontrado en la zona minera central (cortas Emilia, San Valentín y Tomasía), extendiéndose unos 10 km² (Figuras 2.24 y 2.25). También se le encuentra en la zona este (Buen Consejo-Julio César) y en alguna pequeña área aislada (Figura 2.24). Su espesor varía entre los 40-80 m en la zona de San Valentín-Emilia, y los 20 m de Buen Consejo y Julio César.

Su geometría es irregular, siendo su límite inferior, en general concordante y coincidiendo con las filitas basales, en tanto que sus límites superior y laterales son muy irregulares y discordantes respecto a las calizas encajantes, en forma de digitaciones controladas por los

planos de discontinuidad; encontrándose enclaves de caliza dentro de la masa mineralizada, lo que indica un fenómeno de reemplazamiento metasomático, particularmente claro en el tipo "manto de silicatos", donde la masa greenalítica conserva las estructuras originales de la roca (Figura 2.26).

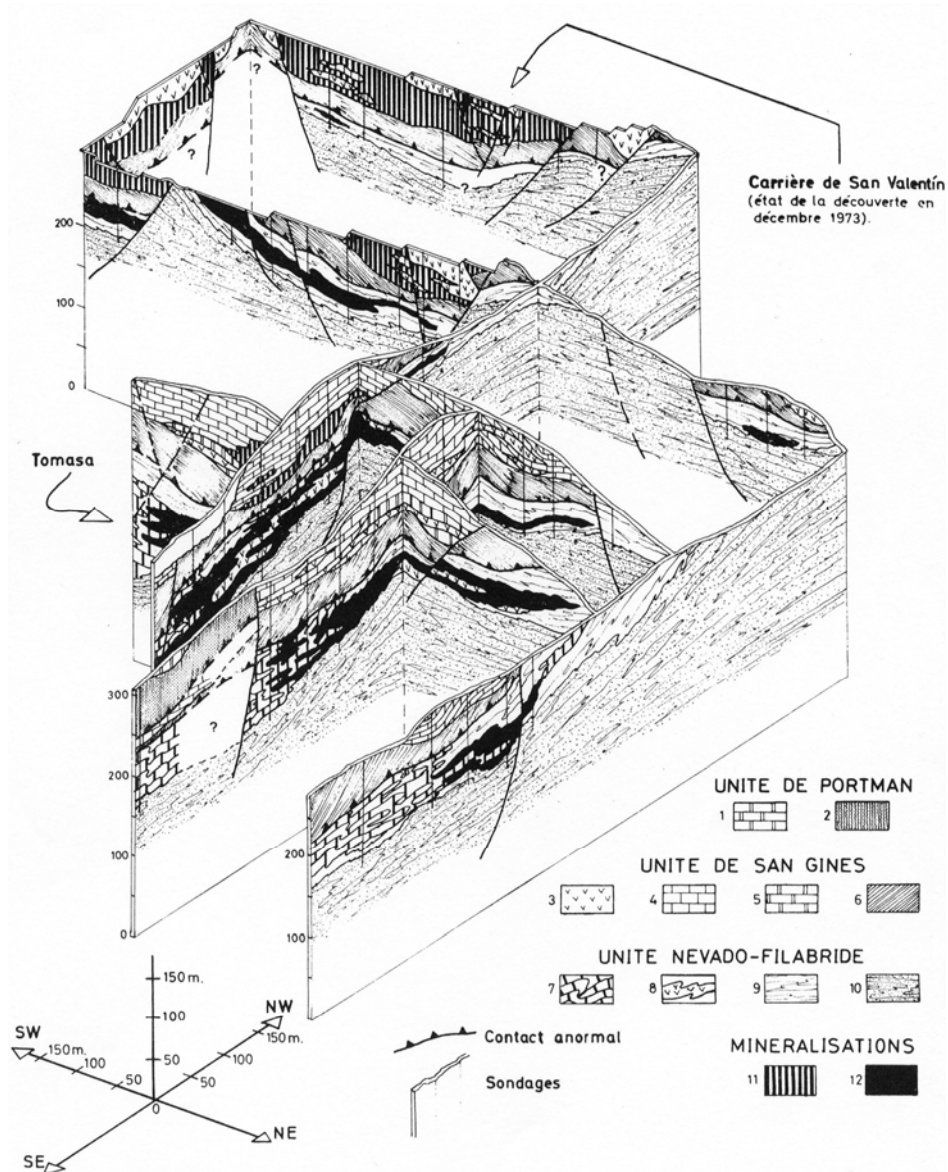


Figura 2.25. Bloque diagrama de los yacimientos de las cortas San Valentín y Tomasa. 1: dolomías; 2: filitas violeta; 3: doleritas; 4: calizas; 5: dolomías claras recristalizadas; 6: filitas violeta; 7: mármoles cipolínicos; 8: metabasitas cloritizadas; 9: micaesquistos y cuarcitas claros con granates; 10: micaesquistos grafitosos con granates; 11: 1^{er} manto de greenalita-magnetita; 12: 2^o manto de magnetita. (Ovejero et al., 1976).

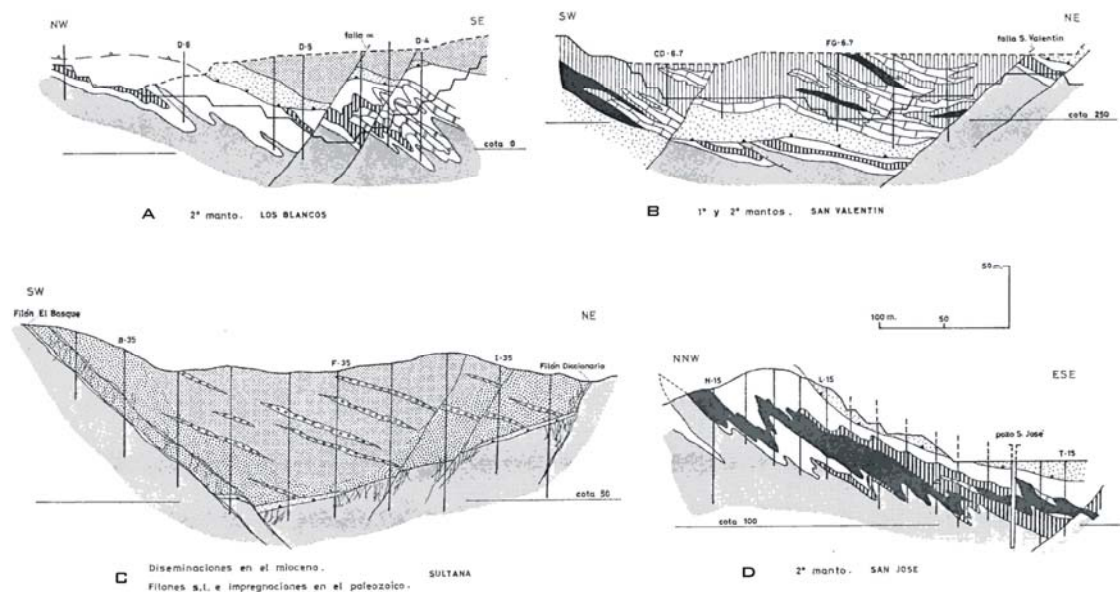


Figura 2.26. Cortes geológicos de algunos yacimientos representativos de distintos cuerpos mineralizados (Manteca y Ovejero, 1992).

"2° manto" o manto inferior

Se sitúa en el complejo Nevado-Filábride superior, al nivel de los mármoles, y se puede encontrar en un área de unos 40 km², de forma pseudoelíptica, con su eje mayor según la dirección NNE-SSO y centrada sobre la zona del Sancti Spiritu (corta San Valentín) (Figura 2.24). Su espesor medio es de 10 m, variando entre 3 y 25 m, según esté relacionado con fracturas o con estructuras de plegamiento (engrosamiento en zonas axiales) (Figura 2.26).

Su geometría es estratiforme y concordante con las rocas encajantes y con sus estructuras de esquistosidad y plegamiento (Figuras 2.26 y 2.27), sin embargo, se muestra discordante en el contacto lateral con los mármoles, controlado por fracturas y superficies de discontinuidad (Manteca y Ovejero, 1992).

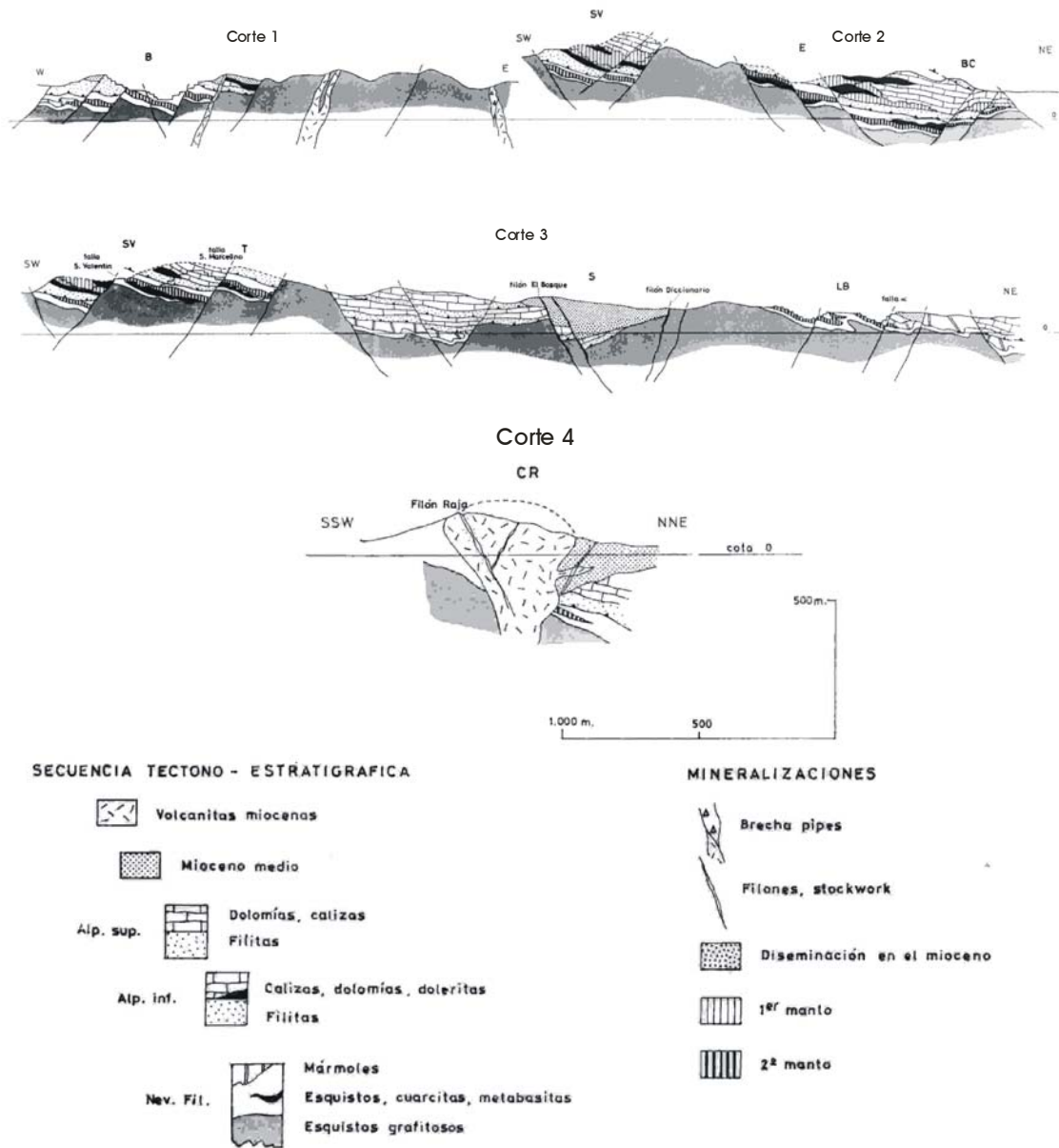


Figura 2.27. Cortes geológicos generales a través de los principales yacimientos. Los cortes se indican en la Figura 2.23 (Manteca y Ovejero, 1992).

Paragénesis minerales de los “mantos”: presentan dos tipos principales de asociaciones minerales primarias, con independencia de su posición estratigráfica (Oen et al., 1975b), cuyas principales características se describen en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Principales características de los “mantos” y zonas mineras donde han sido localizados y explotados.

Quimismo en óxidos y elementos en % en peso	Paragénesis 1	Paragénesis 2
SiO ₂	40%	45%
Fe	20%	35%
MgO + CaO	5%	3%
S	20%	3%
Pb	1,5%	1,5%
Zn	3%	1%
Ag	19 ppm	21 ppm
Zonas mineras		
Buen Consejo	1 ^{er} manto	
Julio Cesar	1 ^{er} manto	
Eloy	1 ^{er} manto	
Los Blancos	2 ^o manto	
Brunita	2 ^o manto	
Gloria Este	2 ^o manto	
Pablo y Virginia	2 ^o manto	
Emilia		1 ^o y 2 ^o manto
San Valentín		1 ^o y 2 ^o manto
Tomasa		1 ^o y 2 ^o manto
San José		2 ^o manto
Gloria		2 ^o manto
Juanito		2 ^o manto
Asociaciones	“manto piritoso” Clorita, sulfuros, carbonatos, sílice.	“manto de silicatos o de magnetita” greenalita, magnetita, sulfuros, carbonatos sílice.
Minerales	Sulfuros principales: pirita, blenda, galena, marcasita, pirrotina Accesorios: calcopirita, arsenopirita, tetradrita y estannina Carbonatos: siderita	Minerales principales: greenalita y clorita Sulfuros: galena, blenda, pirita, marcasita. Accesorios: calcopirita Carbonatos: siderita

2.9.1.2. Diseminaciones en el Mioceno

Constituyen actualmente el recurso minero de mayor importancia (Figura 4.21). Están localizados en una estructura de graben al sur del Llano del Beal (Figura 2.26C y 2.27 corte 3), dentro de la cual forman cuerpos irregulares alargados en la dirección NW-SE, según la fracturación (Figura 2.24). La mineralización aparece diseminada en las diferentes litologías, existiendo una concentración preferencial conforme al aumento de la granulometría del sedimento. Los sulfuros se presentan finamente diseminados en los niveles pelítico-arenosos, casi inapreciables a la vista, y en texturas más gruesas en los niveles conglomeráticos, siendo característico en estos últimos el reemplazamiento de clastos calizos por sulfuros, que adoptan el aspecto de falsos cantos, conocidos localmente como "almendralón" (Manteca y Ovejero, 1992).

Los minerales principales, asociados por orden de importancia, son: pirita, marcasita, blenda y galena; acompañados de clorita y cuarzo. Como minerales secundarios aparecen la pirrotina y la calcopirita.

2.9.1.3. Stockworks y filones asociados a vulcanitas

Se encuentran, de oeste a este de la Sierra Minera, en las zonas de La Parreta, Cabezo Rajao y La Crisoleja (Figura 2.24), una serie de filones de estructura compleja, entre los que destaca el de "La Raja" en el Cabezo Rajao, que presenta una intensa alteración hidrotermal (silicificación, caolinización, cloritización, alunitización) de las vulcanitas (Figura 2.27 corte 4 y Foto 2.24).

Se localizan también mineralizaciones tipo stockwork, tanto en las vulcanitas como en las rocas encajantes, como es el caso de "las chiscarras", término local con que se designa a la desarrollada en las rocas carbonatadas alpujárrides en contacto con aquellas (Figura 2.27 corte 4). En la zona de la Crisoleja se ha desarrollado un stockwork en relación con un domo subvolcánico; con una paragénesis particular, compuesta por minerales de hierro, plomo, plata y estaño: casiterita xiloide (Arribas et al., 1984).

En diversos puntos del Cabezo Rajao y Cuesta de Las Lajas, aparecen diques-brecha o "pipes" afectados por una mineralización similar (Fotos 2.23 y 2.24).



Foto 2.23. Mina Remunerada, en la carretera del 33. Filón de estaño de unos 200 m de longitud, 8 m de potencia media, más de 50 m de profundidad. A la izquierda brecha mineralizada en estaño. Junio, 2004.



Foto 2.24: Filón de galena y plata "La Raja" en el Cabezo Rajao, de 600 m de longitud, 10 m de potencia media y 300 m de profundidad. Año 1998.

2.9.1.4. Cuerpos filonianos y reticulaciones en el paleozoico

Cuerpos filonianos, s.l.

A lo largo de toda la Sierra Minera, pero sobre todo en la zona central, existe un campo filoniano (Figura 2.24), desarrollado a favor del sistema de fracturación principal N130E, cuyas longitudes oscilan entre 500 y 1000 m, y un metro de potencia. Encajan en diferentes niveles litológicos, y se desarrollan en la intersección de las fracturas con los paquetes carbonatados, con engrosamientos laterales; preferentemente en los mármoles nevado-filábrides (Gorguel, Peña del Águila) y con menor importancia en las calizas alpujárrides (Gorguel, Peña del Águila, San Ginés), en los esquistos paleozoicos (Barranco de Mendoza, Cabo de Palos) y en el mioceno (Barranco de Mendoza, Coto Ponce) (Manteca y Ovejero, 1992).

Reticulaciones en el Paleozoico

Estas mineralizaciones en retículos o stockwork, se estructuran dentro de contornos irregulares alargados según la fracturación N130E, y se localizan en los esquistos paleozoicos, a favor de las superficies de discontinuidad. Se desarrollan en los primeros 10 a 20 m de Paleozoico, bajo algunos de los cuerpos mineralizados, bien sea bajo el "2º manto", caso de las cortas Los Blancos y Brunita, o bajo el mioceno mineralizado, como en el Barranco de Mendoza y Sultana (Figura 2.26C).

La génesis de estos yacimientos ha sido siempre motivo de controversia entre los defensores de una única fase ligada al volcanismo Neógeno, y los que propugnan además una actividad metalogénica anterior. Manteca y Ovejero (1992) analizan los controles estructurales y litoestratigráficos de los diversos tipos morfológicos y paragenéticos de mineralización, a escala local y regional, y como resultado presentan dos conclusiones:

1. Evidencia de un control estructural del mineral (reparto de leyes y morfología de los cuerpos) afectando a los diferentes depósitos y que se corresponde con la actividad subvolcánica e hidrotermal Neógena.

2. Respecto a los depósitos tipo "mantos", estratoides y eminentemente ferríferos, se constata además, un control litoestratigráfico (diabasas Mesozoicas) y grandes analogías con depósitos de Fe de edad Triásica en otras partes de las Béticas, lo que sugiere la preexistencia de estas mineralizaciones, antes de alcanzar su actual configuración.

2.9.2. ROCAS INDUSTRIALES

Otros recursos minerales que se han explotado en la sierra minera, son de Rocas Industriales, entre los que se encuentran: 1- cal, 2- yeso, 3- filitas y 4- calizas y dolomías (ver Capítulo 4).

2.10. ACTIVIDAD MINERA

2.10.1. MÉTODOS DE EXPLOTACIÓN

La explotación minera se ha llevado a cabo, básicamente, mediante dos métodos:

Minería subterránea

Es el método empleado para la explotación de filones y masas profundas. Desarrollado en algunos casos por el sistema de “cámaras y pilares” (Foto 2.25), pero de modo más general de forma desordenada (labores de “rapiña”). Este laboreo supuso la apertura de unos 3.000 pozos mineros, de los que actualmente quedan, al menos, 1902 (García et al., 2001) distribuidos por la Sierra Minera, conservándose la mayor parte de sus terreras o acopio de estériles, procedentes tanto de la excavación de los pozos, los cuales tienen un volumen global de $0,51 \text{ Mm}^3$ y un área de $0,02 \text{ Km}^2$, como de las galerías existentes en su interior, que ocupan una extensión de $0,48 \text{ Km}^2$ y suponen 3 Mm^3 (Tabla 4.4).



Foto 2.25. Mina Agrupa Vicente. Carretera del 33. La Unión, junio 2004.

Minería a cielo abierto

El laboreo superficial, contemporáneo con el subterráneo, se ha practicado en la Sierra Minera para la explotación de masas de carbonatos (Botella, 1868). El minifundio empresarial dio lugar a una situación de las explotaciones caótica, inseguras, improductivas, sin perspectivas de futuro, con una degradación total del paisaje, alto grado de contaminación por polvo de mineral y gases de las fundiciones (Vilar y Egea, 1985).

Una modernización posterior dio lugar a las denominadas “cortas”, en las que el laboreo se lleva a cabo en bancos descendentes (Foto 2.26). La explotación minera por éste método comenzó, en la Sierra de Cartagena-La Unión, en 1953 con la apertura de la corta Emilia, y finalizó en 1991 con el cese de toda la actividad minera de la Sierra, habiéndose abierto 12 cortas en total, de las que se extrajeron del orden de 22,6 Mm³ de mineral aprovechable o todo-uno y 126 Mm³ de estériles (Tabla 4.3) que se acumularon en los 32 vacies inventariados (Tabla 4.6).



Foto 2.26. Corta Sultana . Oeste de la sierra de Cartagena-La Unión. (área: 0,306 km², ejes: 500x800 m, profundidad: 200 m). Junio 2004.

El esquema de explotación se muestra en la Figura 2.28: el arranque tanto de material estéril como de mineral, se lleva a cabo mediante perforación y voladuras. La carga se realiza por medio de excavadora que vuelca sobre dumper (Foto 2.27), auxiliada a veces por bulldozer (Foto 2.28). El transporte se hace con dumper, el estéril de recubrimiento y de manto se deposita en vacies o escombreras definitivas; el mineral de baja ley se estoca en escombreras provisionales; y el mineral o todo-uno se lleva a la estación de trituración primaria.

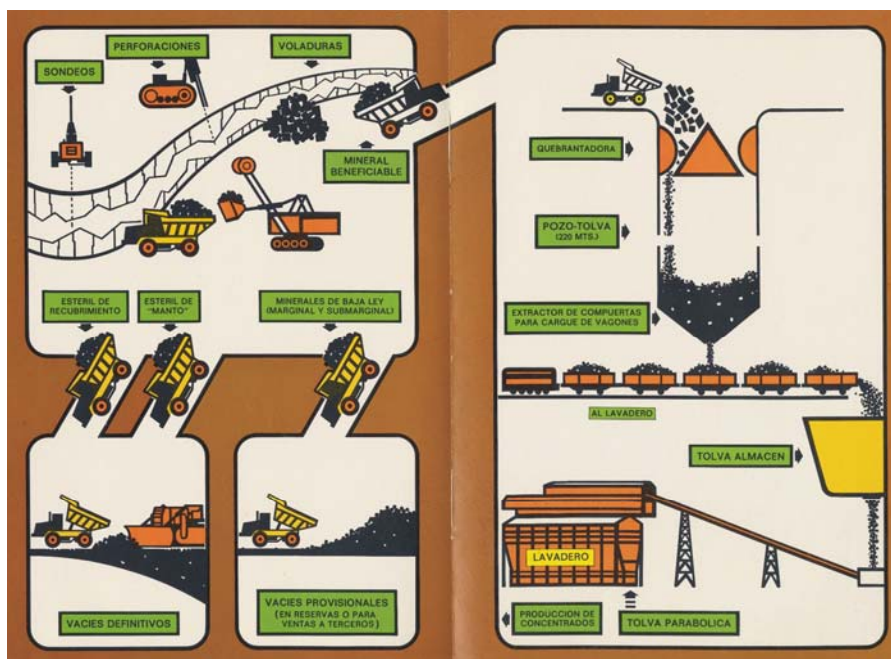


Figura 2.28. Esquema de explotación (SMMP-E, 1970).



Foto 2.27. Carga y transporte.



Foto 2.28. Carga auxiliada por bulldozer.

Actualmente las cortas mineras se encuentran en diferentes estados, tal y como se indica en la Tabla 4.7.

La cobertera mineralizada o “gossan”, que constituye un mineral no aprovechable para la tecnología empleada, por encontrarse en estado de óxido, se ha acumulado en 11 escombreras que ocupan un área de 0,26 km² y contienen 7 Mm³ (Tabla 4.6).

2.11. PROCESOS MINERALÚRGICOS

A continuación se van a describir aquellos procesos mineros-metalúrgicos que han sido empleados en el aprovechamiento de los yacimientos minerales descritos anteriormente.

2.11.1. MÉTODOS DE CONCENTRACIÓN

2.11.1.1. Concentración por Gravimetría

En la minería del siglo XIX, salvo algunos sulfuros muy ricos que, previo un estrío a mano, se vendían tal y como salían de las minas, en general era necesario eliminar la fracción más pobre para aumentar su ley. La concentración por gravimetría es el sistema de concentración de minerales más antiguo. Está basado en la diferencia de densidades que existe entre la mena (“genero” en el argot minero) y la ganga (estéril o “escombro”) (Tabla 2.5).

Tabla 2.5. Valores del peso específico de minerales y ganga (Hurlbut y Klein, 1989).

Mena		Ganga	
Calcopirita	4,2	Paragonita	2,35
Pirrotina	4,61	Montmorillonita	2,5
Tetraedrita	4,85	Cuarzo	2,65
Marcasita	4,89	Calcita	2,71
Pirita	5,02	Talco	2,75
Magnetita	5,18	Moscovita	2,8
Galena	7,5	Pirofilita	2,8
Plata	10,5	Sericita	2,8
		Dolomita	2,85
		Clorita	2,95
		Biotita	3
		Greenalita	3,2

Este método se desarrolló con la ayuda de ciertos aparatos (Botella, 1868) tales como: garbillo, criba de cajón, mesas de arroyo (“royo” en el argot minero) y round-buddles (“rumbo”).

El proceso de concentración gravimétrica más automatizado comenzaba con el vertido, del todo-uno (mena + ganga) que se extraía del filón o mina, en la tolva de entrada, para iniciar la molienda hasta un tamaño adecuado, para lo cual pasaba primero por la machacadora de mandíbulas y después por el molino de rulos. De aquí, el mineral molido pasaba a la sección de cribado, que consistía en una batería de cribas de diferente tamaño de malla, montadas sobre unos cajones, provistos de unos pistones, donde el mineral mezclado con el agua se agitaba y por diferencia de densidades, el estéril o escombro se situaba arriba y el concentrado o genero se depositaba en el fondo.

Los minerales más finos pasaban a los rumbos, que consistían en unas balsas circulares, de unos 3 a 4 m de diámetro y 1 m de profundidad, en cuyo centro se situaba un eje giratorio, provisto de unas barras de longitud menor que el diámetro del rumbo, de las cuales se colgaban unas bayetas de saco que descansaban unos 3 cm sobre el fondo del rumbo (Fotos 2.29 y 2.30). El mineral mezclado con agua, caía por el centro y era

removido, de manera que las lonetas arrastraban el estéril y el concentrado quedaba en el fondo del rumbo.



Foto 2.29. Rumbo (Botella, 1868).



Foto 2.30. Lavadero de la Cuesta de las Lajas. Junio 2004.

Los estériles, procedentes de los lavaderos de gravimetría y de flotación diferencial, se estuvieron vertiendo en las ramblas hasta el año 1956 (Vilar et al., 1991) provocando un importante impacto medioambiental sobre el Mar Menor y el Mediterráneo.

Actualmente el volumen de material acumulado en las 119 terreras de gravimetría inventariadas es aproximadamente de $3,7 \text{ Mm}^3$, y ocupan una extensión de $0,65 \text{ km}^2$ (Tabla 4.6). Dado que muchos lavaderos de flotación de la zona, vivían de lavar terreras antiguas (Morales y Guillén, 2003; Hernando, 2003), se puede estimar un volumen original superior a los 15 Mm^3 .

2.11.1.2. Concentración por Flotación Diferencial

En el proceso de concentración gravimétrica, las pérdidas en las leyes de los metales oscilaban entre el 30 y 50% de los valores obtenidos en bocamina, por lo que urgía una solución técnica apropiada para el tratamiento de minerales cada vez más complejos, de irregular mineralización y de leyes más bajas (Vilar et al., 1991).

La flotación es un proceso de separación y concentración de minerales complejos. Patentado a principios del siglo XIX y aplicado por primera vez en la mina Broken Hill de Australia (Wills, B.A., 1987, 1992), permite el tratamiento de minerales cuyas bajas leyes no permitirían su concentración por otro procedimiento económicamente rentable. Así, durante el periodo 1940-1956, las leyes de los minerales de la Sierra fueron decreciendo desde el 5% al 1,71% el Pb y del 8% al 2,34% el Zn (Vilar et al., 1991).

En la Sierra de Cartagena-La Unión, el primer lavadero de flotación fue El Concilio, situado en la zona del Gorguel. Comenzó su construcción en 1936, pero su puesta en

marcha tuvo lugar en 1940, con una capacidad de tratamiento de 150 t/día, cesando su actividad en 1964. En la década 1940-1951, se instalaron 7 lavaderos, se realizaron 3 ampliaciones y otros 3 en proyecto, con capacidades de tratamiento de 150 a 250 t/día (Vilar et al., 1991). El lavadero Roberto, situado a orillas de la playa de la bahía de Portman, comenzó su construcción en 1952. Su puesta en marcha tuvo lugar en julio de 1957 con 1000 t/día, pasando a 6000 t. en el año 1968; a 7000 t. en 1972, hasta llegar en el año 1978 a las 8000 t/día de todo-uno, con unas leyes medias de 1,5-2% Pb, 2-3% Zn (SMMPE, 1970, 1985). Cesó su actividad juntamente con los vertidos al mar, el 30 de marzo de 1990, siendo sustituido por el lavadero Roberto-II, instalado dentro de la corta Tomasa, cuya puesta en marcha tuvo lugar en septiembre de 1990, parando su producción el 5 de febrero de 1991 (Linares, 2001).

La flotación por espumas se basa en las diferentes propiedades físico-químicas que tiene la superficie de las partículas minerales. Así, respecto al agua los minerales térreos (ganga) son hidrófilos, es decir que tienen afinidad por el agua, en tanto que los metálicos (menas) son hidrófobos. Respecto al aceite sucede al revés, la ganga actúa como hidrófoba y las menas como hidrófilas. Si el todo uno (mena + ganga), triturado a un tamaño inferior a 500 micras, se introduce en un medio acuoso, se añade aceite y se crean burbujas, las menas se adhieren, por afinidad, a las burbujas de aceite y sobrenadan, mientras que la ganga se hunde, con lo cual se consigue la separación entre ambas.

De forma sintetizada, el esquema de tratamiento (Figura 2.29) que tiene lugar se desarrolla de modo secuencial en las siguientes secciones (SMMP-E. S.A.,1985):

1. Trituración primaria, en la que el todo-uno se reduce, en seco, a un tamaño comprendido entre 0 y 150 mm.
2. Molienda. El mineral triturado pasa por molinos que lo van reduciendo, en húmedo, en varias etapas hasta obtener una pulpa con un 50-60% de sólidos y el 70% del tamaño menor de 100 mallas Tyler (147 micras).
3. Flotación de galena y blenda, que se realiza en tres fases:
 - Flotación global de Plomo y Zinc
 - Remolienda del preconcentrado global
 - Diferenciación y concentración de la galena y blenda

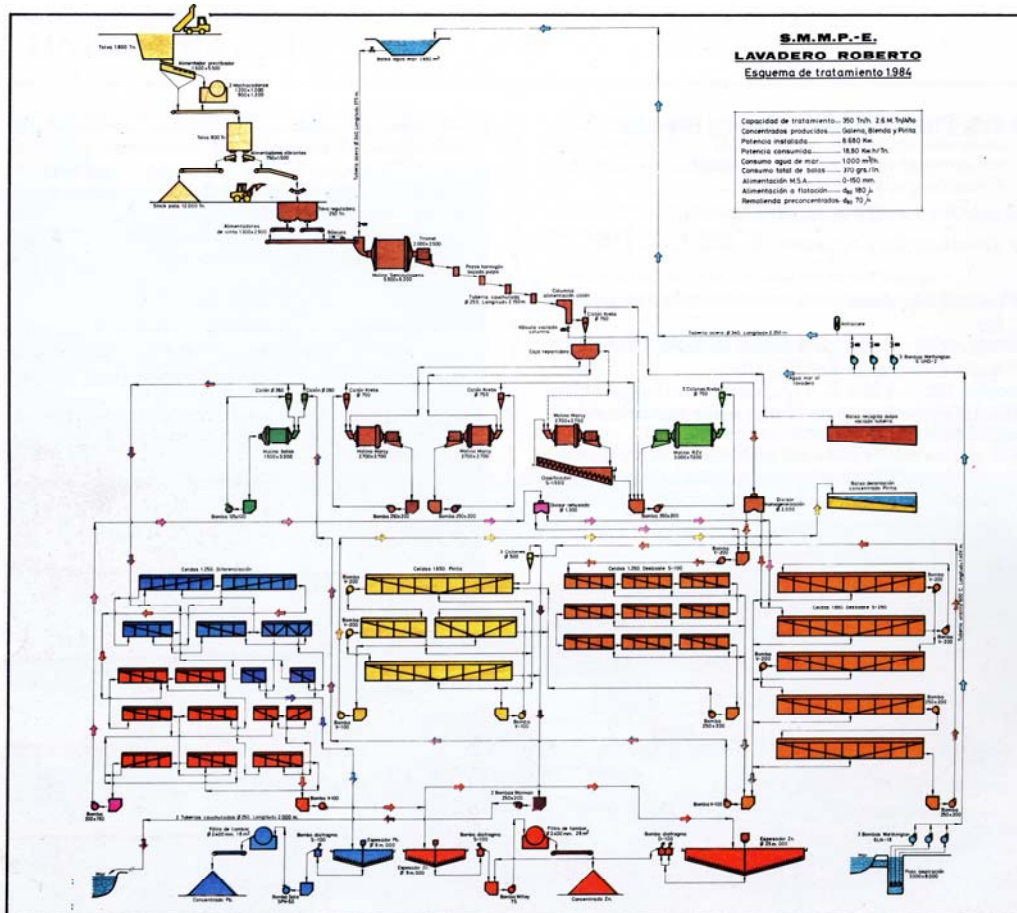


Figura 2.29. Esquema de tratamiento del lavadero Roberto, ubicado en la población Portman (S.M.M.Peñarroya, España, S.A., 1985)

Los reactivos empleados en el proceso de concentración de las menas de plomo y zinc se indican en la Tabla 2.6 siguiente:

Tabla 2.6. Reactivos empleados en el proceso de flotación diferencial (SMMPE, 1980).

Reactivos empleados para activar la galena y deprimir blenda			
Reactivo	Fórmula química	Función	Consumo en g/ton
Isopropil xantato potásico	C ₃ H ₇ -O-CS-SK	¹ Colector	45-60
Cianuro sódico	CNNa	² Depresor de la pirita	85-90
Sulfato de zinc	SO ₄ Zn	Depresor de la blenda	30-50
Sulfito sódico	SO ₃ Na ₂	Depresor de la blenda	20-30
Sulfuro sódico	SNa	Sulfurante y dispersor de los schalams	50-55
Ácido cresílico, aceite de pino		³ Espumante	20-30
Reactivos empleados para activar la blenda y deprimir la pirita			
Speld 3456		Colector selectivo	90-100
Sulfato de cobre	SO ₄ Cu	Activador de la blenda	275-325
Ácido cresílico		Espumante	10-20
Sosa cáustica	NaOH	Depresora de la pirita	90-100
Valor medio: reactivos en g/t			787,5

¹Sustancia orgánica que forma una superficie de tipo hidrocarbonato sobre la partícula mineral contenida en la pulpa acuosa. Flota simultáneamente los minerales hidrófobos. ²El depresor sirve para evitar que floten a la vez dos minerales. ³Utilizado para asegurar la separación entre partículas hidrófilas e hidrófobas.

4. Flotación de Pirita: el circuito de la pirita se alimentaba de los estériles de flotación de Pb y Zn.
5. Filtración: los concentrados de galena y blenda eran espesados y filtrados antes de su expedición, teniendo al final del 5 al 9% de humedad.
6. Transporte a los siguientes establecimientos de beneficio metalúrgico ubicados en Cartagena:
 - La galena a la Fundición Santa Lucía, perteneciente al grupo Peñarroya España, S.A.
 - La blenda para la planta de electrolisis de Española del Zinc, S.A.
 - La pirita para la fábrica de ácido sulfúrico de Explosivos Rio Tinto, S.A.
7. Alimentación de agua: todos los lavaderos de la Sierra Minera se han servido del agua del desagüe de los pozos mineros, excepto el lavadero Roberto, propiedad de la SMMPE, ubicado en Portman, que lo hacía con agua de mar, incorporando 2 m³ por tonelada de mineral tratado.
8. Evacuación de estériles: también aquí hay que diferenciar el sistema seguido por la SMMPE, que consistía en depositarlos directamente en el Mar Mediterráneo, a través de una tubería de conducción, de los del resto de empresas, que lo vertían en balsas, situadas en los alrededores de los lavaderos. Hay que puntualizar que, entre los años 1988 a 1990, algunos lavaderos pequeños, eliminaban sus estériles juntamente con los del Roberto (González y Baños, 1987).

Los contenidos medios de los lodos vertidos al mar, tenían la siguiente composición mineralógica (SMMPE, 1980): Siderita (CO₃Fe): 36%; Arcillas: 26%; Cuarzo (SiO₂): 20%; Magnetita (Fe₃O₄): 16%; Blenda (SZn): 0,11%, Galena (SPb): 0,20%, Ilmenita (TiO₃Fe): 0,44%

Para finalizar, se dan algunos datos relativos de los 34 años de marcha del lavadero Roberto, de la empresa SMMPE, por ser los que mejor se conocen. El todo-uno tratado fueron unos 60 Mt (millones de toneladas), cuyas leyes medias de entrada al lavadero eran: 1,50-2,00% de Pb y 2,00-3,00% de Zn; 800 g de Ag/t, y las de los concentrados fueron: Galena: 72% Pb, <1% Zn y Blenda: 52% Zn, <1% Pb. Se obtuvieron unos 2 Mt de concentrados (galena+blenda) y 820 t de plata. El rendimiento medio del concentrador, se cifra en 75% para la galena y 55% para la blenda.

De los 50 km² de extensión de la Sierra Minera, unos 2 km² están ocupados por las 89 balsas de flotación inventariadas (Tabla 4.6) que contienen 23 Mm³ (millones de metros cúbicos) de estéril o ganga procedente del proceso de flotación diferencial, lo que supone el 4% de la superficie total de ésta. Además, existen otros 25 Mm³ de estériles

que fueron depositados en el mar y que han creado playas con un área total de 0,83 Km² en las Bahías de Portman y Gorguel.

En el lavadero de Coto Ponce, después de la trituración primaria, se hacía una preconcentración (denominada sink and float), que se realizaba eliminando en primer lugar los finos menores de 12 mm y los lodos, después se pasaba el mineral a un separador que se ponía en contacto con un medio denso (suspensión de ferro silicio en agua) y se producía una separación, de manera que la fracción estéril flotaba (float) y el concentrado se hundía (sink).

El único depósito de la fracción estéril o rechazo de granulometría que existe en la Sierra Minera, está ubicado en el Coto Ponce, al Este del Llano del Beal.



Foto 2.31. Panorámica de las instalaciones minero-metalúrgicas de la empresa Real Compañía Asturiana de Minas, en el coto minero de Ponce (Llano del Beal-Cartagena). Año 1974.

2.12. METALURGIA

Los primeros datos que se tienen de la metalurgia de la Sierra de Cartagena-La Unión son de 1842 (Botella, 1868), con la aparición de los hornos “castellanos” o de “cuba”, para la fundición de los escoriales antiguos o romanos, situado el primero en Quitapellejos (Cartagena). En 1846 surgen los hornos “atmosféricos” que permitían fundir carbonatos de plomo. Más tarde aparecen los de “viento forzado” que fundían tanto sulfuros como carbonatos (Fotos 2.32 y 2.33).

En el año 1850 habían 38 fundiciones de plomo en actividad, en tres de ellas existía desplatación, siendo la de “San Isidoro” en Escombreras, “Roma” en las Herrerías (actualmente La Unión) y “Lozana I” en Santa Lucía (posteriormente se convertiría en la función Santa Lucía de la SMMPE). La actividad minera de la época se regulariza en 1848 con la explotación de las minas Bilbao y el Porvenir. Los carbonatos que aparecían en la parte superficial de los criaderos, se explotaron principalmente en La Crisoleja y Los Pedrenales (en 1850 habían 22 minas con 750 obreros).

En 1851 se trabajaba en 290 concesiones que abastecían a 45 fundiciones. Se comienza a explotar en La Crisoleja, Sancti Spiritus y otros lugares, minerales de hierro.



Foto 2.32. Horno de Fundición. Ctra La Unión-El Gorguel. Junio 2004.



Foto 2.33. Horno de Fundición. Estrecho de San Ginés. Junio 2004.

En los años 50, se explotaron en la Sierra hierros manganesíferos. Los más pobres conocidos como “coloraos”, con una ley media del 4-6% de Mn y de 38-40% de Fe. Los más ricos llamados “manganeso”, con leyes del 12-18% Mn y 35-38% de Fe. En los hornos de calcinación los “huesos” de manganeso (argot minero) recibían el primer tratamiento para eliminar impurezas (Vilar et al., 1991).

2.13. PATRIMONIO GEOLOGICO, MINERO Y ARQUEOLÓGICO

2.13.1. PATRIMONIO GEOLÓGICO

El patrimonio geológico (ITGE, 1999b) está constituido por todos aquellos recursos naturales, no renovables, ya sean formaciones rocosas, estructuras, acumulaciones sedimentarias, formas, paisajes, yacimientos minerales o paleontológicos o colecciones de objetos geológicos de valor científico, cultural o educativo y/o de interés paisajístico o recreativo.

Para que el patrimonio geológico pueda ser utilizado socialmente, ha sido necesario, en primer lugar, proceder a su inventariado y catalogación. Por tal motivo el IGME, comienza con esta labor en el año 1978, donde establece los criterios a seguir para la correcta realización de los inventarios.

Por otra parte, es necesaria la promulgación de normativas que contribuyan a la protección del patrimonio. A este respecto, la Ley de Patrimonio Histórico Español (1985), la Ley de Conservación de Espacios Naturales y de la Flora y Fauna Silvestre (1989) fueron pioneras en la materia.

En la Figura 2.30 se muestran los lugares de interés geológico (LIG) de la Sierra de Cartagena-La Unión, el Campo de Cartagena y el Mar Menor, tomados del Patrimonio Geológico de la Región de Murcia (Arana et al., 1999).



Figura 2.30. Mapa de Patrimonio Geológico (Arana et al. 1999). 49: El Carmolí; 50: San Ginés de la Jara; 51: Mar Menor y La Manga; 52: Calblanque; 54: Distrito minero de La Unión; 55: Punta de Escombreras y 56: Cabezo de Mingote.

Ubicado concretamente en el área de estudio se encuentra el LIG 52 (Figura 2.30) denominado Calblanque, de interés estratigráfico y geomorfológico por su contenido y didáctico en cuanto a su utilización. Desde el punto de vista estratigráfico se encuentran dos tipos de materiales: a la base esquistos grafitosos y micaesquistos mosqueados, muy tectonizados, con intercalaciones de cuarcitas, pertenecientes al Complejo Nevado-Filábride, de edad paleozoica; en discordancia sobre éstos se encuentran calcarenitas oolíticas con estratificación cruzada y fragmentos de conchas de origen marino y continental, de hasta 20 m de potencia, de edad Eutirreniense (Arana et al., 1999). Encima reposan otros materiales como bloques y clastos angulosos en matriz limo-arcillosa; sobre estos hay un depósito de arenas litoclásticas más o menos consolidadas y con estratificación cruzada; por último una serie de dunas subactuales, en proceso de destrucción. En cuanto a la geomorfología, las rocas metamórficas condicionan un relieve abrupto, con acantilados de más de 20 m de altura, en tanto que las areniscas ofrecen playas. Además, se pueden observar micaesquistos afectados por un proceso de

alveolización eólica. También presentan una red de diaclasas fuertemente rellenas por siderita que destacan de la roca debido a la erosión diferencial de ambos materiales (Arana et al. 1992).

En áreas de su entorno se encuentran: el LIG 50 (Figura 2.30) de interés geomorfológico y antropológico, donde se pueden ver formas exokárticas (dolinas, uvalas) y otras antrópicas consecuencia de la actividad minera; la Cueva Victoria donde se ha encontrado una falange de uno de los hombres más antiguos de Eurasia (Gibert y Pons-Moya, 1985).

En el LIG 54 (Figura 2.30) no se especifican lugares concretos; se hará más adelante (Berrocal et al., 2004).

El LIG 55 (Figura 2.30) es de contenido geomorfológico y tectónico.

Algo más alejados, el LIG 56 (Figura 2.30) tiene un interés petrológico, donde se pueden observar intrusiones de rocas básicas en materiales béticos.

El LIG 49 (Figura 2.30) es un afloramiento de rocas calcoalcalinas de interés petrológico, donde se puede observar disyunción columnar en las andesitas.

2.13.2. PATRIMONIO MINERO

La intensa actividad minera llevada a cabo en la Sierra de Cartagena-La Unión, ha generado una serie de construcciones, pertenecientes principalmente a las explotaciones mineras subterráneas de la segunda mitad del siglo XIX y principios del XX, tales como castilletes, chimeneas, casas de máquinas, hornos, lavaderos, etc., recogidos en los Catálogos de los Bienes Muebles e Inmuebles de la Sierra de Cartagena-La Unión (Berrocal, 1992/93), en el proyecto fin de carrera de Gambín y García, (1997), y en los trabajos de García et al., (1997), García et al., (2001). Actualmente, dicho conjunto de elementos tiene incoado expediente de declaración de Bien de Interés Cultural (BIC), con categoría de Sitio Histórico, por Resolución de 24 de febrero de 1986, de la Dirección General de Cultura (BORM. N° 70, de 25 de marzo de 1986). Estos elementos se encuentran en mayor concentración en el Cabezo Rajao y a lo largo de la carretera Portman-Llano del Beal.

Después de una etapa de intenso expolio, la situación real en que se encuentra actualmente el patrimonio minero es de continuo deterioro. En medio de este panorama desolador han surgido algunas actuaciones en áreas concretas, tales como la denominada Ruta del 33 (Manteca et al., 1999a), promovida por el Excmo. Ayuntamiento de La Unión (Fotos 2.34 y 2.35); el Proyecto de recuperación de la mina las Matildes de la Fundación Sierra Minera (Fotos 2.36 y 2.37), el Proyecto de

visitabilidad de la mina Agrupa Vicenta (Fotos 2.38 y 2.39) (Manteca y García, 2003), promovido por el Excmo. Ayuntamiento de La Unión y la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), y el proyecto de recuperación de Cueva Victoria, por parte de la Dirección General de Cultura, con la participación de la UPCT (Fotos 2.40 y 2.41); en todos estos proyectos ha participado el autor de esta Tesis.



Figura 2.34. Cartel anunciador de la ruta minera “Carretera del 33”. Junio 2004.



Figura 2.35. Cartel anunciador de la ruta minera. Junio 2004.



Foto 2.36. Castillete de la mina Las Matildes, en restauración. Agosto 2004.



Foto 2.37. Castillete de la mina Blanca. Agosto 2004.



Foto 2.38. Localización de la mina Agrupa Vicenta, en la ctra. del 33.



Foto 2.39. Interior de la mina Agrupa Vicenta.



Foto 2.40. Cartel anunciador de la importancia del yacimiento paleontológico de Cueva Victoria. Agosto 2004.



Foto 2.41. Interior de la primera cavidad de la cueva. Continúan las excavaciones por el equipo del profesor Gibert. Agosto 2004.

2.13.3. PATRIMONIO ARQUEOLÓGICO

El patrimonio arqueológico de la Sierra Minera, ha sido descubierto, en su mayor parte, gracias a los movimientos de tierras producidos por la actividad minera del siglo pasado. En el catálogo de Bienes Culturales y Naturales de la Sierra Minera de Cartagena-La Unión (Berrocal et al., 2004) se encuentran inventariados los yacimientos conocidos.

2.14. ÁREAS PROTEGIDAS DE INTERÉS AMBIENTAL

2.14.1. ESPACIOS NATURALES PROTEGIDOS (ENP)

La Ley 4/1989, de 27 de marzo, de Conservación de los Espacios Naturales y de la Flora y Fauna Silvestres, al amparo de los arts. 45.2 y 149.1.23 de la Constitución Española, tiene por objeto el establecimiento de normas de protección, conservación, restauración y mejora de los recursos naturales y, en particular, las relativas a los espacios naturales y a la flora y fauna silvestres asociada a ellos. En el título III de la citada ley, se clasifican y definen los espacios naturales protegidos en las siguientes cuatro categorías:

a) Parques (regionales). Según el art. 13 de la Ley 4/1989, se definen como áreas naturales, poco transformadas por la explotación 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.

b) Reservas Naturales. Según el art. 14 de la Ley 4/1989, se definen como espacios naturales, cuya creación tiene como finalidad la protección de ecosistemas, comunidades o elementos biológicos que, por su rareza, fragilidad, importancia o singularidad merecen una valoración especial.

c) Monumentos Naturales. Según el art. 16 de la Ley 4/1989, se definen como espacios o elementos de la naturaleza constituidos básicamente por formaciones de notoria singularidad, rareza o belleza, que merecen ser objeto de una protección especial.

d) Paisajes Protegidos. Según el art. 17 de la Ley 4/1989, se definen como aquellos lugares concretos del medio natural que, por sus valores estéticos y culturales, sean merecedores de una protección especial.

Posteriormente, la Ley 4/1992, de 30 de julio, de Ordenación y Protección del Territorio de la Región de Murcia, en su art. 48 expresa que los espacios naturales de la Región de Murcia que, por sus valores, interés ecológico, científico, socioeconómico o cultural, necesiten un régimen especial de protección y gestión, son declarados en alguna de las siguientes categorías.

Red de Espacios Naturales Protegidos (RENPN)

En la disposición adicional tercera, se reclasifican los Espacios Naturales Protegidos, creados por RR.DD. o Resoluciones, que aparecen en la Figura 2.31.

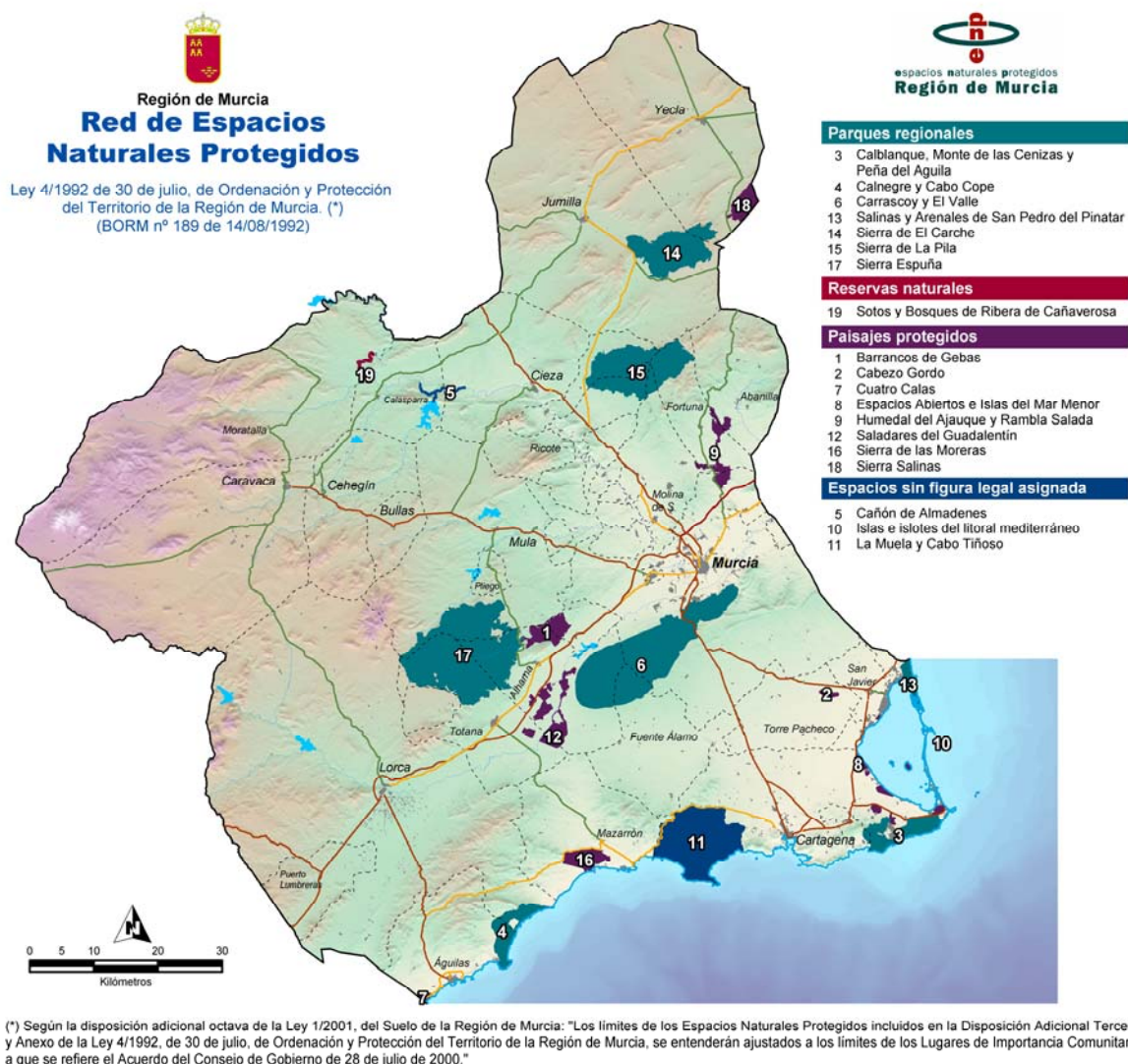


Figura 2.31. Red de Espacios Naturales Protegidos (CAAMA, 2002).

En el área de estudio se encuentra el Parque Regional nº 3 “Calblanque, Monte de las Cenizas y Peña del Águila”, con una extensión de 2.453 ha. Se puede ver que sus límites ocupan gran parte de la Sierra de Cartagena-La Unión. Los valores que justifican su declaración como parque regional son los siguientes: **a) Vegetación:** Lagunas litorales (*Limnietalia*) y zonas subestépicas de gramíneas y anuales (*Thero-brachypodietea*). Palmitares, artales y cornicales. Bosquetes de *Tetraclinis articulata* y enclaves de carrascales. Numerosos endemismos e iberoafricanismos (ver apartado 2.5) **b) Fauna:** Fartet (*Aphanius iberus*). Sapo corredor (*Bufo calamita*) en matorrales y Eslizón ibérico (*Chalcides bedriagai*) en playa y arenales. **c) Geomorfología:** Morfología litoral, aspectos geotectónicos y petrológicos. Sistemas de dunas, paleodunas, arenales, saladares, charcas salineras, acantilados y calas.

Normativa de protección: En 1987 se aprobó el Plan Especial de Protección de Calblanque. Por la Ley 4/1992 de Ordenación y Protección del Territorio de la Región de Murcia se amplió el espacio y se recalificó a Parque Regional. Plan de Ordenación de los Recursos Naturales (PORN) aprobado por Decreto nº 45/1995, de 26 de mayo, y publicado en el BORM de 3 de julio de 1995.

2.1.4.2. RED NATURA 2000

Esta red está integrada por los LIC y las ZEPAS

Lugares de Importancia Comunitaria (LIC)

En la Figura 2.32 aparecen los Lugares de Importancia Comunitaria (LIC), según acuerdo del Consejo de Gobierno de 28-7-2000 (BORM nº 181 de 5-8-2000). En nuestra área de estudio se encuentran el LIC ES6200001, que corresponde a “Calblanque, Monte de las Cenizas y Peña del Águila” y el LIC ES6200025 Sierra de la Fausilla.



Figura 2.32. Lugares de Interés Comunitario (CAAMA, 2002).

En el área de influencia donde desembocan varias de las ramblas que descienden por la Sierra Minera, se encuentran el ES6200006 Espacios abiertos e islas del Mar Menor; el ES6200029 Franja litoral sumergida de la Región de Murcia; y el ES6200030 Mar Menor.

Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPAS)

En la Figura 2.33 aparecen las Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPAS), según aplicación de la Directiva 79/409/CEE del Consejo de 2 de abril, relativa a la Conservación de las Aves Silvestres. En nuestra área de estudio se puede ver la referencia ES0000260 correspondiente al Mar Menor, que ocupa una superficie de 15.000 ha. Esta zona se ve directamente afectada por los aportes de aguas ácidas y sedimentos en suspensión de la escorrentía superficial que transportan las ramblas procedentes de la Sierra Minera (ver Capítulo 7).

Su declaración se justifica por los altos valores naturales. Poblaciones de aves acuáticas nidificantes regulares: cigüeñuela (*Himantopus himantopus*), Avoceta (*Recurvirostra aboceta*), Chorlitojo patinegro (*Charadrius alexandrinus*), Charrancito (*Sterna albifrons*).



Figura 2.33. Zonas de Especial Protección para las Aves (CAAMA, 2002).

Zonas Especialmente Protegidas de Importancia para el Mediterráneo (ZEPIM)

En la Figura 2.34 aparecen las Zonas Especialmente Protegidas de Importancia para el Mediterráneo (ZEPIM), propuesta en octubre 2001 por la Dirección General del Medio Natural de la Región de Murcia y aprobada en el “XII Congreso de las Partes Contratantes del Convenio de Barcelona” realizado en Mónaco del 14 al 17-11-2001.

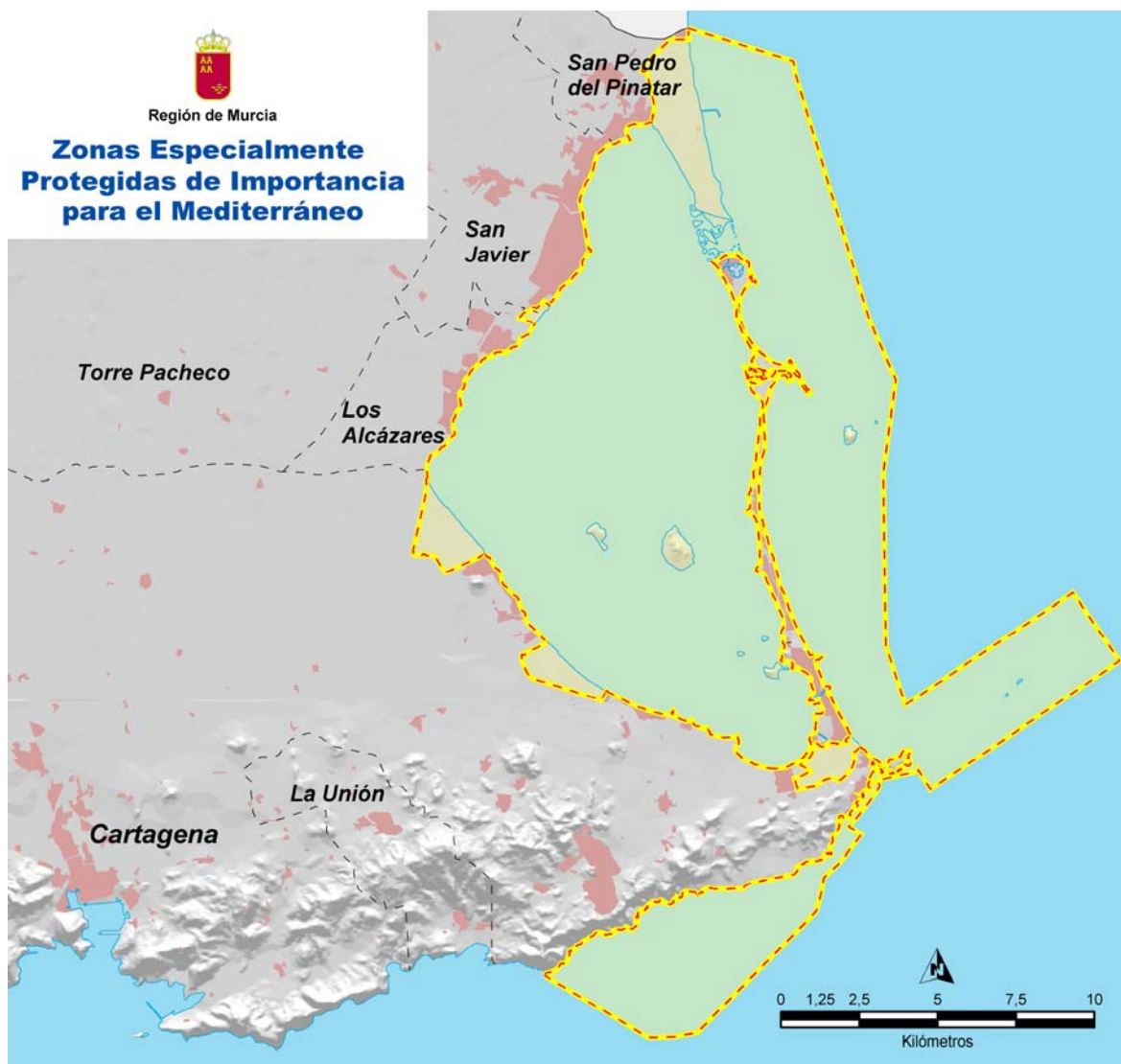


Figura 2.34. Zonas Especialmente Protegidas de Importancia para el Mediterráneo (CAAMA, 2002).

Se ha definido una única zona que es el área del Mar Menor y zona oriental mediterránea de la costa de la Región de Murcia, con una superficie de 27.503 ha.

Los valores que justifican su declaración son: **a) Vegetación:** En hábitats marinos destaca la presencia de praderas de *Posidonia oceanica*. Aparece *Zostera nolti*, *Cystoseira mediterranea*, *Cystoseira spinosa*, *Cystoseira zosteriodes*. Entre la vegetación terrestre se presenta el único sabinar de dunas (*Juniperus turbinata*) que sobreviven en la Región. Juncales, pastizales halófilos y tarayal entre otras especies de

interés. **b) Fauna:** Invertebrados marinos: *Thetya sp.*, *Ophidiaster ophidianus*, *Dendropoma petraeum*, *Litófaga litófaga*, *Pholas dactylus*, *Luria lurida*, *Erosaria spurca*, *Charonia lampas*, *Centrostephanus longispinus*, *Asterina pancerii*, *Astroides calycularis*, *Axinilla polypoides*, *Pinna nobilis*. Peces: Fartet (*Aphanius (Lebias) iberus*), Caballito de mar (*Hippocampus hippocampus*). **Reptiles:** Tortuga boba (*Caretta caretta*), *Dermochelys coriacea*. **Aves:** *Padion haliaetus*, Pardela cenicienta (*Calonectris diomedea*), *Hydrobates pelagicus*, Gaviota de Audouin (Larus **audouinii**), *Phoenicopterus ruber*, *Sterna albifrons*, *Sterna sandvicensis*, Cigüeñuela común (*Himantopus himantopus*), Garceta común (*Egretta garzetta*), Terrera marismeña (*Calandrella rufescens*), Avoceta común (*Recurvirostra aboceta*), Charrancito común (*Sterna albifrons*), Pagaza piconegra (*Gelochelidon nilotica*), Paiño común (*Hydrobates pelagicus melitensis*). **Mamíferos:** Delfín común (*Delphinus delphis*), Delfín mular (*Tursiops truncatus*).

CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS

CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. GENERALIDADES

Para la realización de esta tesis se ha seguido la metodología clásica de todo trabajo de investigación. Consta de cuatro etapas fundamentales: 1) Búsqueda de bibliografía sobre los temas tratados. 2) Obtención de datos de campo. 3) Trabajo de laboratorio y 4) Análisis y tratamiento de la información en gabinete.

En el análisis de la información existente se han consultado artículos, revistas, informes, cartografía temática diversa, fotos aéreas, imágenes de satélite, etc. Además, publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España (IGME), la Confederación Hidrográfica del Segura (CHS), Instituto Nacional de Meteorología (INM), Instituto Español de Oceanografía (IEO); así como datos procedentes de la ya extinta empresa Sociedad Minero Metalúrgica de Peñarroya España, S.A. (SMMPE), muchos de los cuales fueron elaborados por el autor, ya que perteneció a la misma desde 1970 hasta 1988.

Una parte importante de la información existente, que se sintetiza en la tesis pertenece a informes y trabajos realizados a empresas y organismos públicos nacionales y regionales, por parte del Grupo de Investigación “Ingeniería del Territorio y de los Recursos Geomíneros” del que forma parte el autor de esta tesis.

3.2. TRABAJO DE CAMPO

3.2.1. INVENTARIOS

Inventario de pozos mineros: debido a la gran extensión del área de estudio (100 km²), la orografía y los malos accesos, el trabajo de campo ha sido muy laborioso, habiéndose dedicado mucho tiempo y un gran esfuerzo material y económico. Se ha tomado como base el inventario de pozos mineros realizado por García et al., (2001).

Inventario de puntos de agua: se han medido los niveles piezométricos de todos los puntos de agua, donde se incluyen los pozos mineros, fuentes, galerías y cortas mineras; para la medida del nivel se ha utilizado una sonda eléctrica Seba K-LL. Posteriormente se ha efectuado una selección del 25% de los mismos y en ellos se han tomado muestras de agua, para la medida de pH, conductividad eléctrica y el análisis de los componentes mayoritarios y metales en el laboratorio.

Inventario y muestreo de residuos minero-metalúrgicos: se ha realizado la cartografía de todos los residuos mineros, tomando muestras de los tipos diferenciados, para su caracterización en laboratorio. El número de depósitos de residuos inventariados

ha sido de 2351 (Tabla 4.4), cuya distribución por cuencas hidrográficas de ramblas se cita en el Capítulo 4 (Tabla 4.5).

Inventario de cortas mineras: se han cartografiado 12 cortas y se han sintetizado algunas de sus características más representativas (Capítulo 4, Tabla 4.6), así como del estado en que se encuentran actualmente (Capítulo 4, Tabla 4.7) y del uso que se ha dado a algunas de ellas.

Inventario de canteras: se han cartografiado cinco canteras de rocas industriales, que actualmente están activas en la Sierra Minera (Capítulo 4, apartado 4.4.2).

Inventario de lugares de interés geológico y minero: se han inventariado 160 elementos patrimoniales mineros y 28 puntos de interés geológico (Capítulo 4, Tabla 4.9). Simultáneamente con la elaboración de esta tesis, se ha firmado un contrato con la Consejería de Cultura de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia (Berrocal et al., 2004) , que ha analizado este tema.

3.2.2. TOMA DE MUESTRAS

Aguas subterráneas: el agua de los pozos mineros se ha tomado con un toma muestras de 0,5 L. de capacidad. En todos los puntos de agua se tomaron muestras por duplicado y se filtraron (filtro de 0,45 micras). Una de ellas acidificada con ácido nítrico (HNO_3), en las que se determinaron las concentraciones de metales en el agua. En las muestras no acidificadas se determinaron las propiedades físico-químicas y sus elementos mayoritarios. En campo se ha medido, en todas las muestras, la conductividad y el pH con un equipo pH/Cond 340i/SET, y la temperatura. Se muestrearon 105 pozos mineros, 2 manantiales, 2 cortas mineras y 2 galerías de mina (Tabla 3.1)



Foto 3.1. Medida de nivel en un pozo minero.



Foto 3.2. Toma de muestras de agua en un pozo minero.

Aguas superficiales: se recogieron muestras de agua de escorrentía, después de un periodo de lluvia, en las ramblas del Beal y Gorguel, con el mismo procedimiento de

muestreo que el aplicado a las aguas subterráneas, para su estudio en laboratorio (Tabla 3.1).

Aguas de lluvia: se tomaron 27 muestras de agua de lluvia, 16 en la estación termopluviométrica de Cabo de Palos y 11 en la de El Algar (Tabla 3.1).

Agua de mar: En la desembocadura de la rambla del Beal con el Mar Menor, se tomaron 2 muestras y en el Mediterráneo otras dos, una en la bahía de Portmán y otra en la del Gorguel (Tabla 3.1).

Tabla 3.1. Resumen de puntos de muestreo de agua por cuencas hidrográficas de ramblas.

Rambla	Pozos	Manantiales	Corta	Galerías	Superficiales	Lluvia	Mar
Carrasquilla	12	1				16	
Ponce	13		1				
Beal	19				3		2
Matildes	16						
Miedo	15	1				11	
Portmán	14			1	1		1
Gorguel	8			1	2		1
Escombreras	6		1				
Hondón	2						
Suma	105	2	2	2		27	4

3.3. TRABAJO DE LABORATORIO

3.3.1. CARACTERÍSTICAS DE LA FASE LÍQUIDA

Las muestras de agua, no acidificadas, de los pozos mineros, manantiales, galerías de mina, cortas mineras, superficiales, lluvia y mar, han sido analizadas por el laboratorio “Centro de Análisis de Aguas, S.A.” (CAASA), con los procedimientos y equipos que se indican a continuación.

Tabla 3.2. Normas de Ensayos de Aguas utilizadas por el laboratorio CAASA.

Conductividad a 20° C	Electrometría (P.I.E. Cond).
pH	Electrometría (P.I.E. pH).
Cloruros	Método argentométrico de Mohr. (P.I.E. CLOR).
Sulfatos	EspectroFotometría de absorción (P.I.E. SULF).
Bicarbonatos	Acidimetría, con anaranjado de metilo (P.I.E. ALCA).
Carbonatos	Acidimetría, con fenolftaleína. (P.I.E. ALCA).
Nitratos	EspectroFotometría de absorción (P.I.E. NITA).
Sodio	Fotometría de llama. (P.I.E. SODI).
Magnesio	Complexometría (P.I.E. DURE).
Calcio	Complexometría (P.I.E. CALC).
Potasio	Fotometría de llama. (P.I.E. POTA).
Nitritos	EspectroFotometría de absorción (P.I.E. NITI).
Amonio	EspectroFotometría de absorción (P.I.E. AMON).
Boro	EspectroFotometría de absorción (P.I.E. BORO).
Anhídrido fosfórico	EspectroFotometría de absorción (P.I.E. FOSF).
Anhídrido silicio	EspectroFotometría de absorción (P.I.E. SILI).
Hierro	EspectroFotometría de absorción (P.I.E. MANG).
Manganeso	EspectroFotometría de absorción (P.I.E. MANG).

Las muestras acidificadas fueron analizadas por el laboratorio del Departamento de Química de la Universidad de Girona (UG), mediante ICP masas. Se determinaron los metales: Cd, Pb, Zn, Cu, Ni.

3.3.2. CARACTERÍSTICAS DE LA FASE SÓLIDA

El conocimiento de las propiedades físicas de los residuos mineros es de extraordinaria importancia en los estudios medioambientales, pues condicionan el comportamiento geoquímico, hidrogeológico y mecánico de los materiales porosos.

3.3.2.1. Propiedades físicas

La densidad seca, densidad natural, peso específico de las partículas, humedad, porosidad, índice de poros y grado de saturación se han determinado en el Laboratorio de Geotecnia, Departamento Ingeniería del Terreno, de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, de acuerdo con la norma ASTM, (1993) y Jiménez y Justo, (1975).

3.3.2.2. Análisis granulométrico

De los 2351 depósitos de residuos inventariados (Capítulo 4, Tabla 4.4), se han realizado 70 ensayos de granulometría, 47 en seco y 23 en húmedo, repartidos según se indica en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Número de muestras para caracterización de granulometrías en los distintos tipos de residuos.

Tipo de residuo	Ensayo ASTM (en seco)	Ensayo ASTM (en húmedo)
Estéril de corta		2
Balsas de flotación	15	4
Lodos flotación en mar		4
Terreras de gravimetría	29	2
Escombrera de Mina	1	2
Escombreras de óxidos		3
Rechazo de granulometría	2	2
Gacheros		2
Escombrera de pozo minero		2
Suma	47	23

Granulometría por sedimentación: las 23 granulometrías por sedimentación en húmedo se realizaron en el Laboratorio de Geotecnia del Departamento de Ingeniería del Terreno, de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, de acuerdo con la norma Annual Book Standards Manual (ASTM, 1993).

A la fracción menor de 0,5 milímetros de cada muestra se le aplicó el análisis granulométrico por el método de difracción láser, con un equipo Malvern (Mastersizer/E) con capacidad de trabajo en el rango de 0,5 a 600 micras. Esta última

determinación se realizó en el Instituto de Ciencias de la Tierra Jaume Almera, del Centro Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

Límites de Atterberg: los límites se realizaron a 8 muestras de lodos de flotación según el procedimiento de la norma ASTM, (1993). Las determinaciones se realizaron en el Laboratorio de Geotecnia del Departamento Ingeniería del Terreno, de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, de acuerdo con la norma ASTM, (1993), donde los resultados muestran que el material presenta un comportamiento no plástico o de muy baja plasticidad.

pH: Se hicieron 71 determinaciones, 16 en lodos de flotación y 27 en estéril de gravimetría, y 3 en cada uno de los otros residuos; sobre extractos 1:2,5 en agua destilada. Esta analítica fue realizada en el Laboratorio del Área de Ciencia y Tecnología Agraria de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT) y la Universidad de Girona (UG).

3.3.2.3. Composición mineralógica

La difracción de Rx se efectuó con un difractómetro de geometría BRAGG - BRENTANO $\alpha/2\theta$ SIEMENS D-500 con Radiación $K\alpha$ del Cu $\alpha= 1.5418 \text{ \AA}$ a 40 kV y 30 mA, monocromador secundario de grafito. Los difractogramas medidos de 4 a $70^\circ 2\alpha$ con tamaño de paso de $3''$. Se analizaron 12 muestras. Las fases minerales se identificaron con el programa de computación DIFFRAC-AT que utiliza el banco de datos Powder Diffraction File (PDF-1) del International Centre for Diffraction Data (ICDD). Los análisis se realizaron en el Servicio Científico Técnico de la Universidad de Barcelona. Además se hicieron 8 análisis para contrastar los resultados, en el Centro Superior de Investigaciones Científicas “Jaume Almera” de Barcelona. Se realizó la digestión y determinación de la composición de 8 muestras en la Universidad de Girona.

Mediante microscopía electrónica de barrido se han obtenido 10 espectros de diversas muestras de residuos (ver en anexo figuras A3.1 a A3.10). El equipo empleado ha sido un HITACHI S-3500N.

3.3.2.4. Composición química de la fase sólida

Para determinar la composición se tomaron 0,2 g. de sólido y se secaron en estufa a 40 grados. En las muestras se analizaron 18 elementos (Fe, Cr, Ni, Co, Zn, Al, Mn, Cu, Pb, Ag, Cd, V, Mg, S, Ti, Sr, K, Mg), por AAS e ICP-AES, previa digestión total de las muestras por ataques sucesivos de HF, HNO₃ y HClO₄. Se emplearon patrones que permiten corregir las desviaciones de la concentración de los diferentes elementos analizados. Los análisis se realizaron a 10 muestras, representativas de los tipos de residuos, en el Servicio Científico Técnico de la Universidad de Barcelona.

3.3.2.5. Ensayos geotécnicos

Se han efectuado ensayos geotécnicos a las muestras de residuos. Las normas seguidas en cada caso han sido las siguientes:

Tabla 3.4. Normas de Ensayos Geotécnicos.

Determinación límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande	UNE 103 103
Determinación del límite plástico de un suelo	UNE 103 104
Determinación con agua oxigenada del contenido en materia orgánica en los suelos	UNE 7368/77
Determinación de la relación entre la densidad seca y la humedad de un suelo. Proctor normal	UNE 103 500
Determinación del índice CBR en el laboratorio	UNE 103 502
Corte Directo	ASTM D-3080/79
Granulometrías en seco	ASTM, 1993
Granulometrías en húmedo	ASTM, 1993

3.3.2.6. Parámetros hidráulicos

Se han realizado ensayos de permeabilidad en dos sondeos por el ensayo de Gilg-Gavard, sobre muestras de residuos mineros en laboratorio, según la norma ASTM, (1993). Además se efectuaron otros seis ensayos en lodos de flotación y gravimetría.

3.3.2.7. Propiedades mecánicas

Para estimar los parámetros de resistencia se han realizado ensayos de corte directo y ángulo de fricción interna. ASTM, 1993.

3.3.2.8. Caracterización geoquímica

En el estudio de impacto y riesgo ambiental con presencia de flujo y transporte de contaminantes, una correcta identificación del comportamiento geoquímico de los diferentes componentes tóxicos permite considerar las hipótesis adecuadas en cuanto a la forma y al posible modelo conceptual de migración de los elementos contaminantes en el medio natural.

El estudio experimental de la transferencia química al medio hídrico se efectuó por medio de tests de lixiviación (*batch*) a distintas proporciones agua/sólido (residuos y materiales geológicos secos). Los ensayos tipo *batch* se efectuaron a los nueve tipos de residuos mineros identificados. Las muestras fueron colocadas en contacto con agua Milli-Q, con pH=7 y las ratio variables (1:2,5 y 1:5), manteniéndolas en agitación mecánica durante 24 horas a temperatura controlada en el laboratorio (22±2°C). La determinación de las concentraciones se efectuó por AAS e ICP-AES, determinando la

concentración de Fe, Cr, Ni, Co, Zn, Al, Mn, Cu, Pb, Ag, Cd, V, Mg, S, Ti, Sr, K). Las muestras fueron ensayadas por triplicado, así como el uso de patrones y 4 blancos, para corregir posibles errores analíticos, los blancos y patrones sufrieron el mismo tratamiento que las muestras de residuos.

3.4. TRABAJO DE GABINETE

En esta etapa se ha realizado el procesamiento de toda la información existente y de la generada durante el trabajo de campo y de laboratorio. Se han confeccionado mapas, figuras y cuadros en formato papel y digital, así como la creación de las bases de datos necesarias para su tratamiento con un sistema de información geográfica (SIG) en un futuro inmediato. A esta información técnica se le acompañan fotografías del terreno, con el fin de que el texto sea más comprensible al lector.

CAPITULO 4. INVENTARIO DE ESTRUCTURAS MINERAS

CAPITULO 4. INVENTARIO DE ESTRUCTURAS MINERAS

La evaluación del impacto y riesgo ambiental, en áreas mineras abandonadas, requiere del conocimiento e inventariado de las diferentes estructuras mineras existentes en el territorio estudiado. También es importante conocer los recursos de los distintos minerales y rocas con posibilidades de ser explotados, así como aquellos bienes de interés cultural asociados a la actividad minera.

La realización del inventario y la observación del estado físico y ambiental de las estructuras mineras, permiten evaluar el impacto y riesgo ambiental y delimitar las áreas más afectadas por éstas. En este trabajo se ha realizado una cartografía temática y se han reflejado todas las estructuras mineras existentes en la zona de estudio, que son las siguientes: (a) pozos mineros, (b) cortas, (c) depósitos de residuos minero-metalúrgicos, (d) áreas de minas subterráneas, (e) canteras. También se han inventariado (f) yacimientos de mineral Pb-Zn, investigados y evaluados por la empresa Sociedad Minero Metalúrgica de Peñarroya-España, S.A. (SMMP). Entre los bienes culturales y naturales se incluyen (g) elementos del patrimonio minero, (h) del patrimonio geológico y (i) del arqueológico.

4.1. POZOS MINEROS

4.1.1. METODOLOGÍA EMPLEADA

Se ha tomado como base el trabajo de García et al., (2001) “Inventario de Pozos mineros de la región de Murcia (Sierra de Cartagena)”, cuyo investigador principal fue el autor de esta tesis. Dicho autor ha seguido investigando en el tema (García y Manteca, 2002) y la metodología que se presenta a continuación supone una mejora a los trabajos referidos. Básicamente consta de tres partes principales: **ficha** para toma de datos en campo (Figuras A4.1 a y b ver en anexo), **materiales** empleados y **procedimientos** de trabajo. Los datos recopilados en la ficha, se trasladan posteriormente a una **base de datos** para su procesamiento informático y estudio de las posibles **aplicaciones** que se puedan derivar. Esta metodología supone una mejora de la publicada por García et al., (1997).

En la Figura 4.1 se muestra el diagrama de flujo que se ha seguido en las diferentes etapas de aplicación de la metodología durante el trabajo de campo y gabinete para la confección del inventariado.

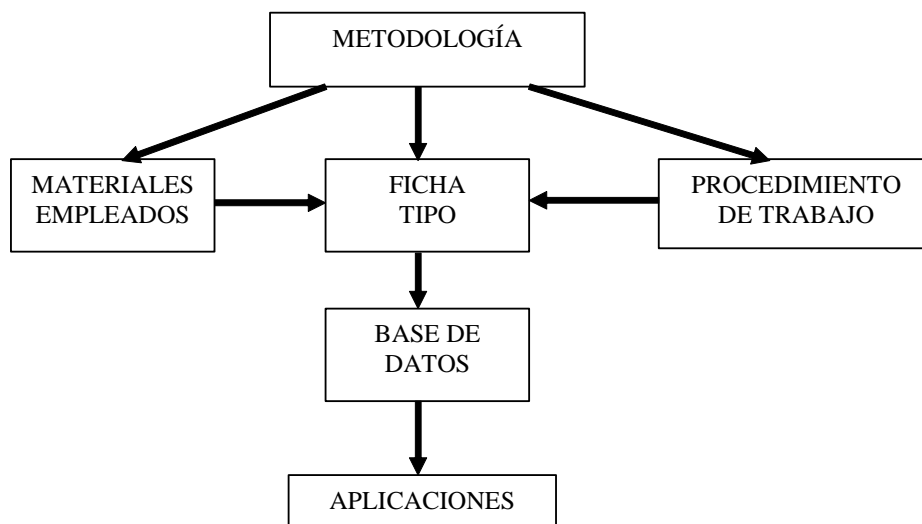


Figura 4.1. Diagrama de flujo de la metodología para inventario de pozos mineros.

El soporte informático, de creación de la base de datos, está desarrollado en el programa EXCEL, bajo Windows 98, y culmina con la generación automática de una ficha con toda la información procesada para cada pozo.

4.1.2. DATOS QUE COMPONEN LA FICHA DE CAMPO

La ficha elaborada (Figuras A4.1 a y b) para la toma de datos en campo, tiene las características que se indican en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Características de los diferentes apartados que componen la ficha de campo.

Identificativos	Constructivos	Del entorno	Informativos
Fecha del inventario	Revestimiento: material, longitud	Accesibilidad	Elaborada por
Tipo	Profundidad	Visitabilidad	Protección: tipo, sección, dimensiones
Número de pozo	Sección tipo	Proximidad a población	Peligro
Otros números	Dimensiones		Restos arqueo industriales
Concesión minera	Cimentación		Existencia de agua
Toponimia			Uso del agua
Coordenadas			Profundidad del agua
Cota absoluta			Nivel piezométrico
Término municipal			Otras observaciones
Referencias próximas			Fecha Foto
			Dirección Foto
			Materiales de la terrera

4.1.3. PROCEDIMIENTO DE TRABAJO

Tal y como se especifica con anterioridad, el objetivo primero fue la realización por parte de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia (CARM), de un inventario de todos de los pozos mineros que se encuentran en la Sierra de Cartagena-La Unión, comprendidos dentro de los términos municipales del mismo nombre.

Para tal fin, en un principio se trató de localizar los pozos por medio de fotografías aéreas, pero teniendo en cuenta que las dimensiones de los pozos oscilan entre 1,5 y 3,5 m de diámetro y que la escala de las fotos es 1/18.000, sobre éstas los pozos resultan de un tamaño de 0,1 a 0,2 mm, los cuales no son identificables con seguridad. No obstante se han utilizado las fotos aéreas para localizar las escombreras o terreras de los pozos, que en muchas ocasiones sí se aprecian y junto a ellos estaban los pozos.

Por tal motivo, el procedimiento seguido para su localización, ha consistido en dividir el área de estudio en cuadrículas coincidentes con los mapas a escala 1/5.000, editados por el servicio de cartografía de la Consejería de Obras Públicas y Ordenación del Territorio de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. El trabajo de campo se realizó recorriendo vaguada tras vaguada y localizando cada uno de ellos en fotos aéreas y luego en mapas 1:5.000.

Una vez localizado un pozo, sobre su elemento de protección, se ha pintado, para su identificación, el número C- correspondiente y confeccionada la ficha de inventario de acuerdo a la metodología descrita con anterioridad.

4.1.4. POZOS INVENTARIADOS

Los pozos inventariados se han incluido en la denominada “Base de Datos de Pozos Mineros” (García et al., 2001), siendo el número de éstos de 1902 (actualizado al 28 de marzo de 2002) que se encuentran distribuidos en 20 hojas del mapa topográfico regional a escala 1/5000, según se indica en Tabla 4.2 y en la Figura 4.2.

Tabla 4.2. Distribución de los pozos mineros en los mapas topográficos regionales.

HOJA 977 -II (escala 1:25.000)			HOJA 978-I (escala 1:25.000)			
-	(72) ¹	(82)	(12)	-	-	-
	3 ²	31	359			
(63)	(73)	(83)	(13)	(23)	(33)	(43)
1	72	269	501	74	17	31
(64)	(74)	(84)	(14)	(24)	(34)	
21	25	268	146	3	3	-
HOJA 977-IV			HOJA 978-III			
(65)	(75)	(85)	(15)	-	-	-
59	6	9	4			

¹(72) = El nº entre paréntesis indica la hoja del Mapa Topográfico Regional, escala 1/5000: 977-72

²3 = Número de pozos en el mapa 977-72

Total de pozos mineros inventariados = 1902

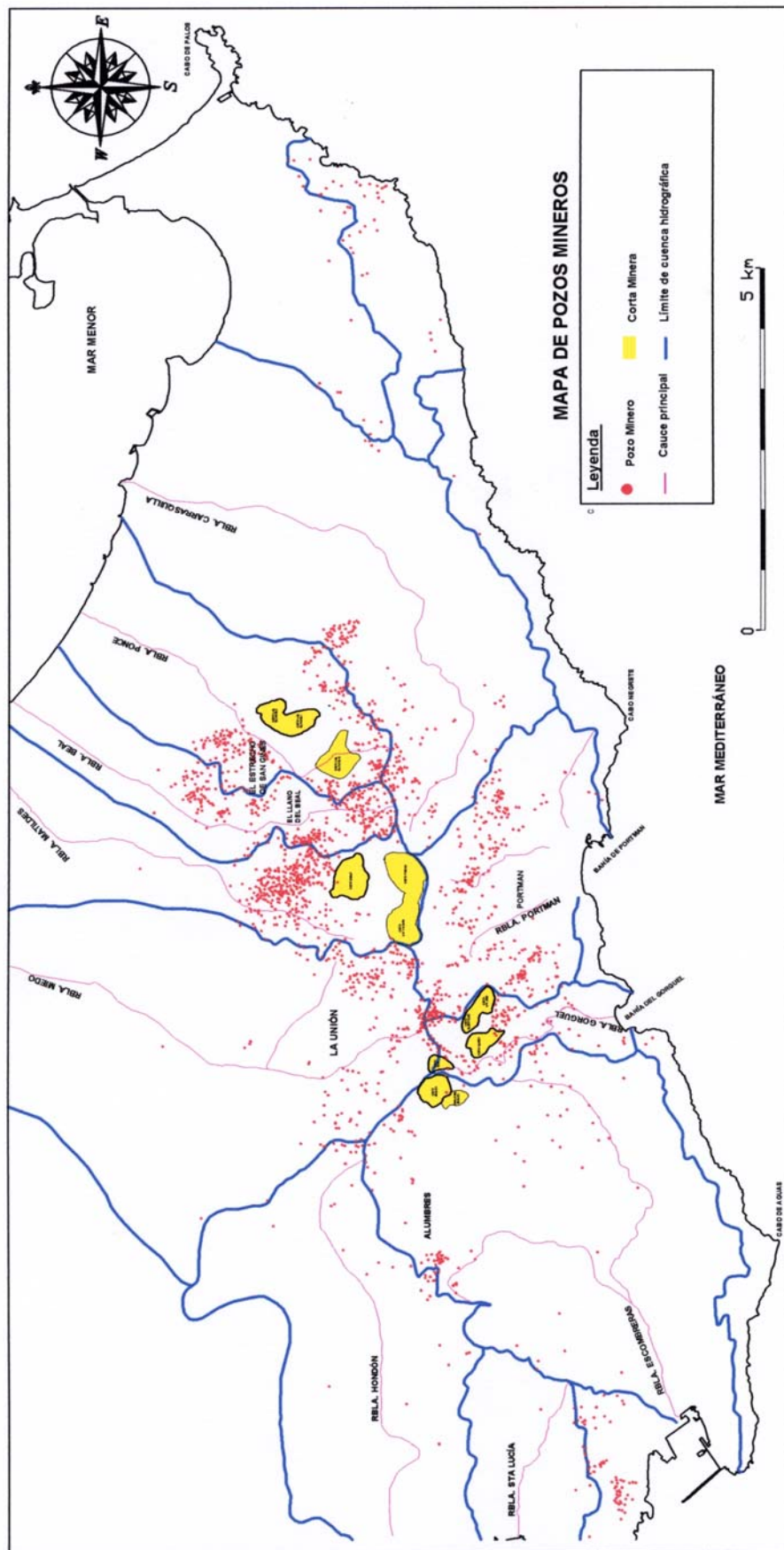


Figura 4.2. Mapa de distribución de pozos mineros de la Sierra de Cartagena-La Unión. Mapa reducido del original a escala 1:25.000.

4.1.5. APLICACIONES DE LOS DATOS OBTENIDOS

4.1.5.1. Seguridad minera

Al ser ésta una zona de minería abandonada, una aplicación muy importante del inventario es evaluar la seguridad (García y Manteca, 2002) para las personas y animales, ya que está previsto que se produzca un cambio en el uso del suelo que tiende hacia el ocio y tiempo libre. Esto lo confirma el hecho de los proyectos en curso para la puesta en valor de los lugares de interés geológico-minero y arqueológico de “Cueva Victoria” y “Minas Matildes y Blanca” en el Llano del Beal y de “Agrupa Vicenta” en la carretera del 33 en La Unión.

4.1.5.2. Estudios Hidrogeológicos

Los datos de nivel piezométrico han servido para elaborar el mapa de isopiezas de la Sierra de Cartagena-La Unión, cuyos acuíferos no habían sido estudiados de forma integral hasta el momento (ver Capítulo 6).

4.1.5.3. Geología

Los materiales geológicos de la terrera se han utilizado para conocer, aunque sin precisión, las unidades geológicas atravesadas en los pozos.

4.1.5.4. Datos Estadísticos

Se ha realizado el análisis de la información adquirida, lo que ha permitido crear una base de datos, la cual se ha tratado estadísticamente y los resultados se han representado en una serie de gráficos que se interpretan a continuación.

4.1.5.4.1. Mapa de densidad de pozos por km²

Para realizarlo se ha partido del mapa donde se encuentran todos los pozos inventariados (Figuras 4.2 y 4.3). Se ha dividido la Sierra en cuadrículas de 0,5 x 0,5 km (0,25 km²), asignándole el número de pozos que se encuentran en cada una de ellas, siendo el resultado el mapa de isoconcentración de pozos (Figura 4.4). Este mapa sirve como orientación de zonas con mayor o menor seguridad. Hay que destacar que en este mapa se pone de manifiesto una correlación con las dos principales direcciones de fracturación del material rocoso (N130E y la N60E) y la zona de mayor isoconcentración de pozos (Figura 4.3 y 4.4).

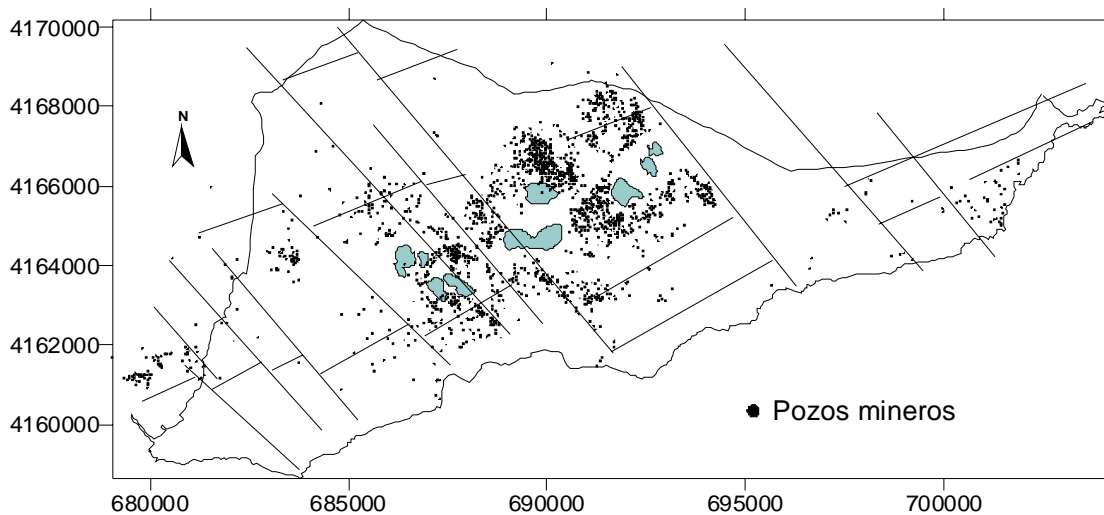


Figura 4.3. Localización de los pozos mineros inventariados en la Sierra de Cartagena-La Unión.

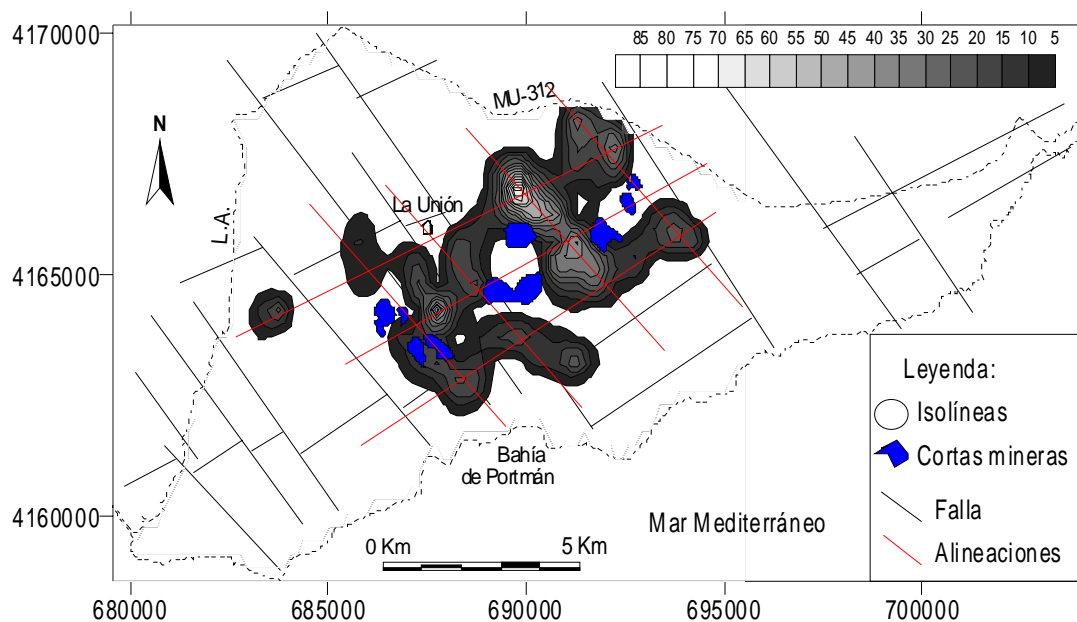


Figura 4.4. Mapa de isoconcentración de pozos de la Sierra de Cartagena-La Unión.

4.1.5.4.2. Tipos de protección

Se han clasificado los diferentes modos en que se han llevado a cabo la protección de los pozos mineros, resultando los 12 tipos diferentes que se indican en la Figura 4.5 y en las Fotos 4.1 a 4.8, en la que se puede destacar lo siguiente:

1. Existe un elevado porcentaje de pozos sin brocal (18%), lo que convierte a las zonas de la Sierra Minera, en las que se encuentran éstos, en áreas de un elevado peligro o riesgo potencial.
2. La utilización mayoritaria de la protección con bloques (46%), es debida a la campaña de restauración de brocales que se está llevando a cabo, desde hace

varios años, por parte de la Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.

- Se utiliza la protección mediante “alambrada” en aquellos pozos que resulta muy laborioso aportar materiales para hacer los brocales, debido a la dificultad de acceso.

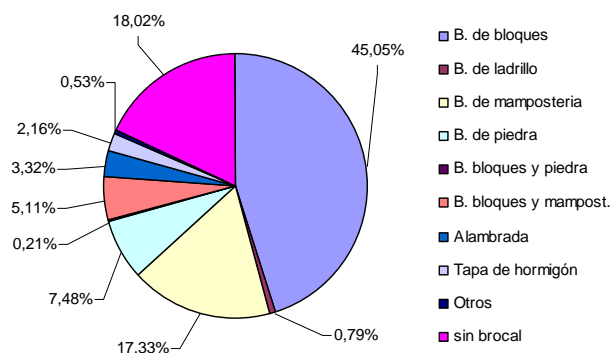


Figura 4.5. Tipos de protección de los pozos mineros.



Foto 4.1. Protección de ladrillo.



Foto 4.2. Protección de bloques.



Foto 4.3. Protección de mampostería.



Foto 4.4. Protección de bloques-mampostería.



Foto 4.5. Protección de hormigón.



Foto 4.6. Protección de alambrada.



Foto 4.7. Pozo sin protección.



Foto 4.8. Protección de piedra.

4.1.5.4.3. Altura de protección

Tiene una relación directa con el peligro que representan los pozos mineros. Se han clasificado con una escala de cuatro valores. De este parámetro se puede destacar (Figura 4.6):

- 1) Hay un elevado porcentaje de pozos sin brocal (18%), puesto de manifiesto anteriormente en la Figura 4.8 y Foto 4.8.
- 2) Más de la mitad de los pozos (53%) tiene una altura de protección adecuada, superior a un metro. Se considera que una altura inferior resulta muy peligrosa.
- 3) Superan los 1,5 m aquellos pozos cuya protección está hecha con alambrada, y representan el 4% del total (Foto 4.6).

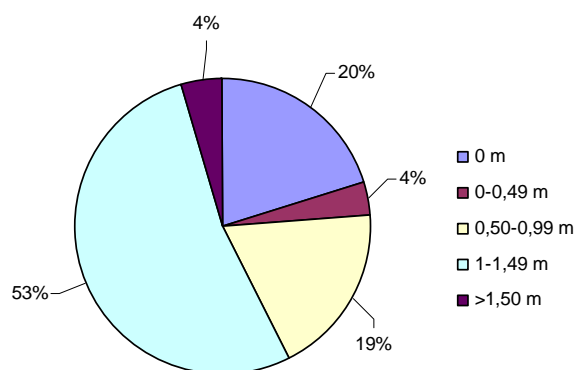


Figura 4.6. Altura de las protecciones de los pozos mineros.

4.1.5.4.4. Revestimiento de los pozos mineros

Se ha tenido en cuenta si la caña del pozo se encuentra revestida hasta los primeros 25 m de profundidad. Se ha realizado una clasificación en 5 tipos, en función del material empleado (Figura 4.7) que son: sin revestir, ladrillo, piedra, mampostería u otros.

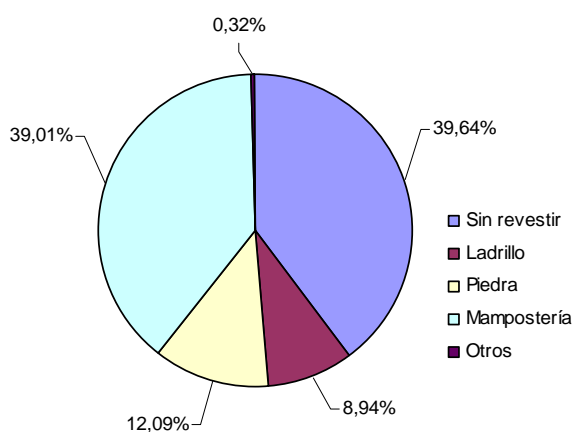


Figura 4.7. Revestimiento de los pozos mineros.

Este apartado tiene su importancia, ya que existen varios pozos que por no estar revestidos, presentan un embudo en la boca (ensanchamiento en la parte superior) e incluso pozos con hundimiento (Foto 4.9 y 4.10). La ausencia de protección y la existencia de hundimientos, aumentan la peligrosidad de éstos. Además, la ausencia de protección dificulta el poder identificar la presencia de los pozos, aumentando el riesgo para las personas y animales que pasen por la zona. A todo esto hay que añadir que se desconoce la probabilidad de ocurrencia de los hundimientos en los pozos que no tienen revestimiento.



Foto 4.10. Embudo en la boca del pozo referencia 978-23-17-C708.



Foto 4.10. Embudo en la boca del pozo referencia 978-12-167-C22.

4.1.5.4.5. Profundidad de los pozos mineros

Se ha realizado una clasificación agrupando los pozos en intervalos de 25 m de profundidad, partiendo de aquellos que tienen menos de 25 m y terminando con los que tienen más de 225 m (Figura 4.8). Como se puede ver, el intervalo de profundidades es muy amplio, con predominio de los pozos de menos de 25 m que representan el 42% del total; le siguen los comprendidos entre 25 y 50 m, con el 25% y los de 50 a 75 m y 100 a 125 m, ambos con el 12%. El resto de los pozos tienen profundidades que representan valores entre el 4 y el 1% del total.

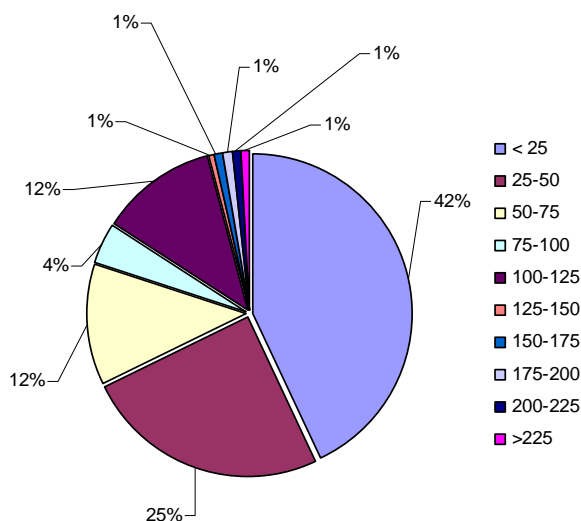


Figura 4.8. Profundidad de los pozos mineros (expresada en m).

4.1.5.4.6. Tipos de secciones de los pozos

La prolongada actividad minera de la Sierra ha sido desarrollada en diferentes épocas, así como por diferentes métodos mineros, desde los más artesanales hasta modernos sistemas tecnológicos. Una muestra de ello lo constituye la variedad de formas geométricas que presentan los pozos mineros inventariados en el área de estudio.

En la Figura 4.9 se han representado las diferentes secciones con que se han construido los pozos y que son: circular, rectangular, cuadrada, elíptica, etc. Se puede apreciar que la forma predominante es la circular (78%) y en segundo lugar la elíptica (12%).

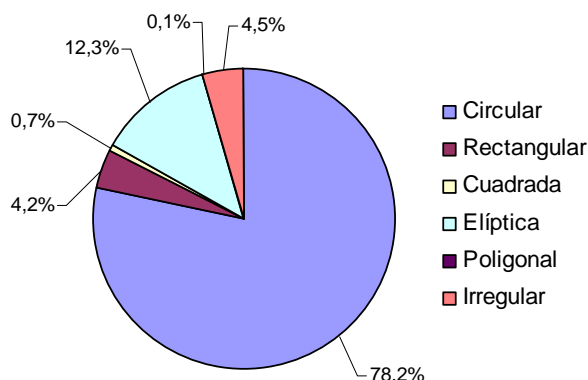


Figura 4.9. Tipos de secciones de la protección de los pozos.

4.1.5.4.7. Dimensiones de las secciones de los pozos

Los pozos mineros se han construido con secciones que oscilan entre 0,5 m de diámetro mínimo hasta 4,5 m de máximo. En la Figura 4.10 se han representado en intervalos de 0,5 m de diámetro, comenzando por 0,5 m y terminando en mayores de 4 m. De esta Figura se destaca lo siguiente: el 73% de los pozos tienen un diámetro comprendido entre < 0,5 y 2,5 m. Este diámetro, relativamente pequeño, se debe a que estos pozos se construyeron en una época de la minería en la que existían los llamados “partidarios”, que eran pequeños empresarios, incluso particulares que se iniciaban en el negocio minero.

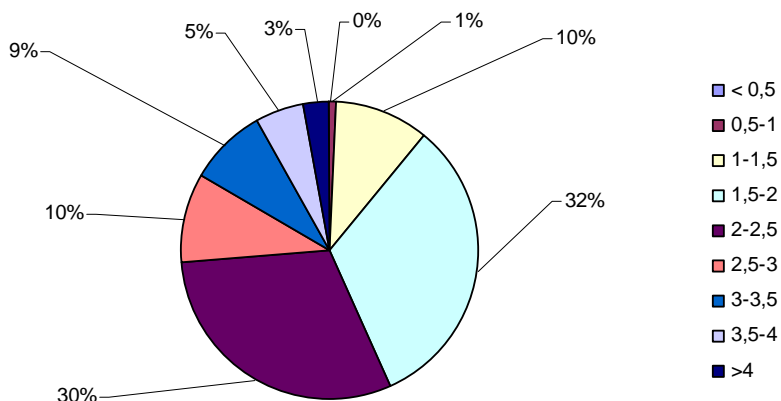


Figura 4.10. Dimensiones de las secciones de los pozos (diámetro en metros).

4.1.5.4.8. Cimentación

Se ha tenido en cuenta si el pozo se encuentra excavado sobre suelo o roca. Esta observación tiene relación con la peligrosidad, ya que si el pozo se encuentra sobre roca, éste no necesitará recubrimiento y tendrá mucha más estabilidad que si lo está sobre suelo. En el caso de estar sobre suelo, generalmente se trata de rellenos cuaternarios con escasa resistencia y baja cohesión, y que, si no están recubiertos, representan un peligro potencial. En la Figura 4.11 se pone de manifiesto que predominan los pozos sobre suelo, lo que indica que existe un riesgo de hundimiento en el 73% de los casos.

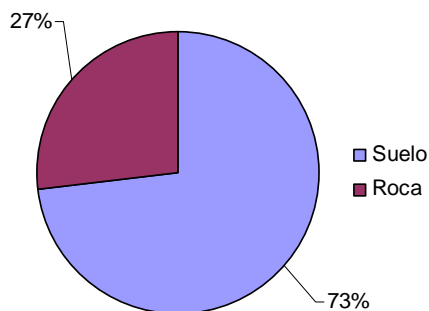


Figura 4.11. Cimentación del pozo.

4.1.5.4.9. Peligro

Como se ha comentado anteriormente, este campo tiene una relación directa con la altura del elemento protector del pozo. Se ha tomado para ello una escala de cuatro valores. De la Figura 4.12. se puede destacar:

- a) Existe un elevado porcentaje de pozos sin brocal (18%), puesto de manifiesto anteriormente en la Figura 4.4.
- b) Tan solo el 57% tiene una altura de protección adecuada, superior a 0,9 metros, considerando que una altura inferior resulta muy peligrosa.

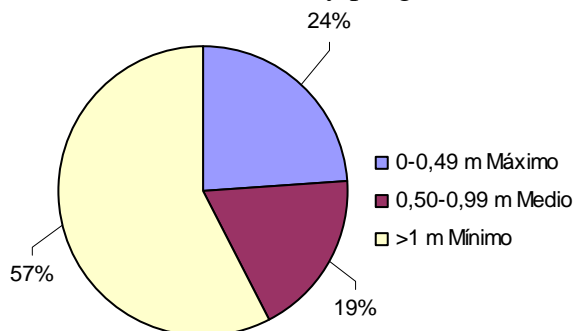


Figura 4.12. Peligro (en función de la altura de la protección).

4.1.5.4.10. Accesibilidad

Este es uno de los tres campos que han servido para definir la intensidad del peligro, (García y Manteca, 2002). En la Figura 4.13 se puede apreciar como el volumen de pozos que es accesible a las personas es muy elevado (74%) y de ellos el 34% es accesible con coche.

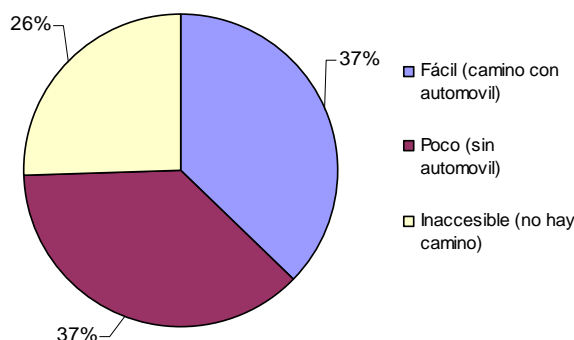


Figura 4.13. Accesibilidad a los pozos mineros.

4.1.5.4.11. Proximidad a núcleos de población

Es el segundo de los parámetros que define la intensidad del peligro. En la Figura 4.14 se puede apreciar como el 35% de los pozos se encuentran cercanos a zonas habitadas. Esta es una de las razones por la que su visitabilidad es tan elevada.

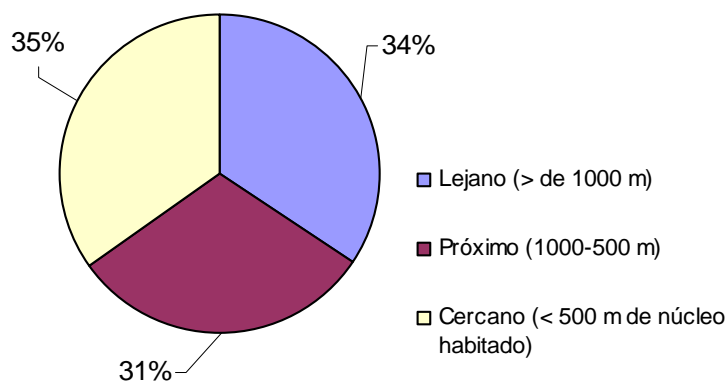


Figura 4.14. Proximidad de los pozos a núcleos de población.

4.1.5.4.12. Visitabilidad

Este es el tercero y último de los parámetros empleados en la valoración de la intensidad del peligro (García y Manteca, 2002).

Como se puede apreciar en la Figura 4.15, el 39% de los pozos mineros inventariados en la Sierra Minera son visitados frecuentemente. Esto es un indicativo de la necesidad de conocer su ubicación y establecer su protección para disminuir su riesgo ambiental.

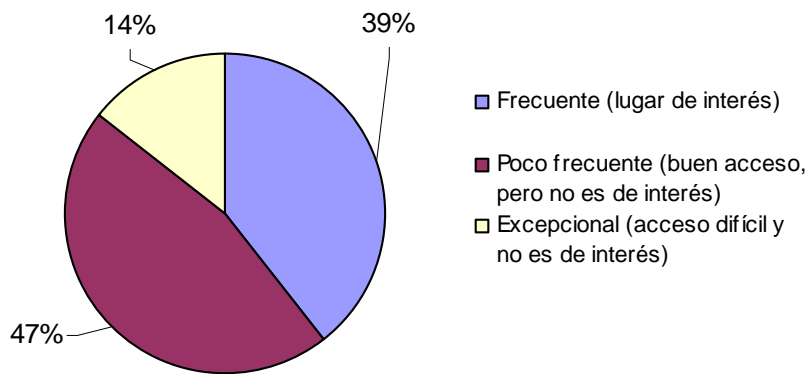


Figura 4.15. Visitabilidad del entorno de los pozos.

4.1.5.4.13. Existencia de restos arqueo-industriales

A lo largo de la Sierra Minera quedan evidencias de diversos elementos arquitectónicos, tales como los que se muestran en las Fotos 4.11 a 4.16, construidos durante la época minera, que se encuentran en las proximidades de los pozos y que actualmente constituyen un valor patrimonial y cultural, cuya puesta en valor va en aumento. Por tal motivo, se ha tomado nota de la existencia de estos elementos y se han inventariado. Es de señalar que además de estos, existe gran número de instalaciones mineras en ruinas, que no representan ningún valor patrimonial y que constituyen un impacto paisajístico importante.

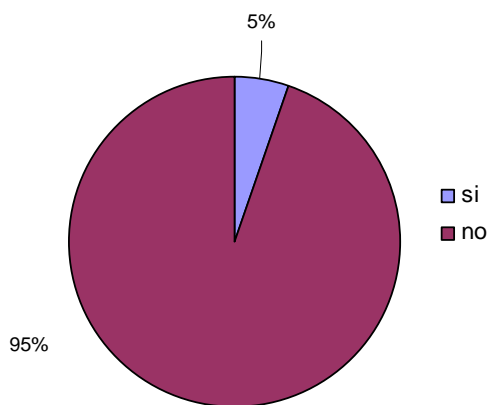


Figura 4.16. Existencia de restos arqueo-industriales en la proximidad de los pozos mineros.



Foto 4.11. Castillete de mampostería. Concesión minera ‘San Guillermo’.



Foto 4.12. Castillete de madera de la mina San Simón. La Parreta (Alumbres).



Foto 4.13. Castillete de hierro de la mina Montserrat. Cabezo Rajao.

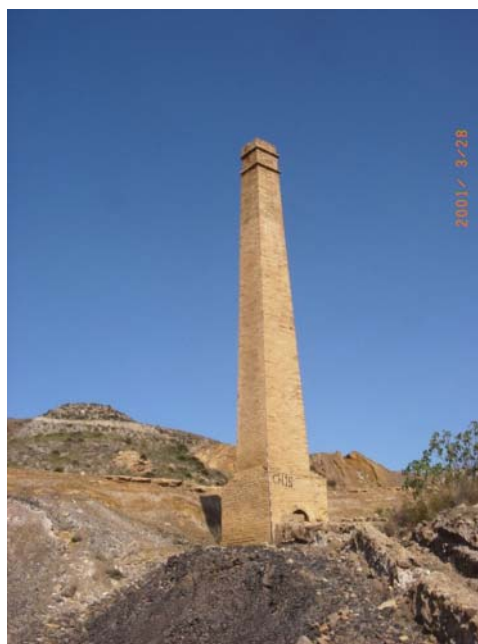


Foto 4.14. Chimenea de máquina de vapor de la mina S.Fco Javier. Ctra del Gorguel.



Foto 4.15. Hornos de Fundición de manganeso. El Descargador.



Foto 4.16. Malacate de madera. Entrada a la corta Emilia.

4.1.5.4.14. Existencia de agua

Este campo ha servido para realizar el inventario de los pozos con agua. En el 25% de éstos se ha realizado la toma de muestras para su análisis y estudio hidroquímico, y siempre que era posible se medía la profundidad del pozo. También se ha medido el nivel piezométrico del agua para confeccionar el mapa de isopiezas y caracterizar el flujo del agua subterránea (ver Capítulo 6).

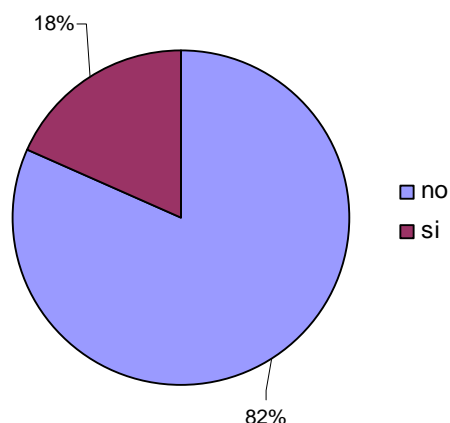


Figura 4.17. Existencia de agua en los pozos mineros.

4.1.5.4.15. Uso del agua

Como se puede ver en el gráfico de la Figura 4.18, el uso del agua es prácticamente nulo, siendo el porcentaje de pozos en los que se extrae agua del 0,42%. Su uso está limitado por la calidad de las aguas (ver Capítulo 6).

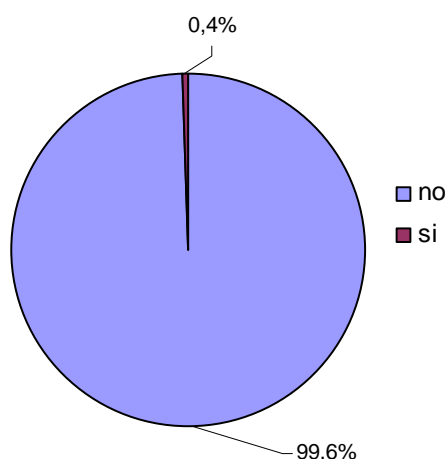


Figura 4.18. Uso del agua de los pozos mineros.

4.2. CORTAS MINERAS

Con el desarrollo de la tecnología de arranque y movimiento de rocas (excavadoras, bulldozers, dumpers, etc.), a partir del año 1957 se inicia la explotación a cielo abierto (cortas mineras) en la Sierra de Cartagena-La Unión. Este tipo de explotación permite la extracción con beneficio de minerales con leyes mucho más bajas que las extraídas por minería subterránea. Se trata de excavaciones a cielo abierto, realizadas por bancos descendentes, de altura variable entre 14 y 5 m. Las operaciones básicas que se desarrollan son: arranque mediante perforación y voladuras, carga y transporte. Los materiales estériles se depositan en escombreras y el todo-uno se lleva hasta el inicio de la instalación de trituración.

Se han inventariado 12 cortas mineras (Figura 4.22) explotadas en la Sierra de Cartagena-La Unión por la empresa SMMPE. En la Tabla 4.3 se relacionan algunas de sus características, tales como: la fecha de inicio y terminación de la explotación; el número de mantos mineros explotados, así como su paragénesis mineral; potencia del material estéril de recubrimiento y de la masa mineral, así como los tonelajes correspondientes. El área total ocupada por las 12 cortas es de 2,4 km². En la Tabla 4.4 se cita el uso que se está dando a algunas de las cortas, y su estado actual.

Tabla 4.3. Características de las cortas mineras explotadas en la Sierra de Cartagena-La Unión.

	Emilia	S.V.	Tomasa	G.	G.E.	S.J.	B	B.O.	Eloy	LB-I	LB-II	LB-III
Fecha inicio	1954	1966	1966	1966	1980	1981	1984	1986	1982	1970	1982	1984
Fecha terminación	1982	1988	1988	1984	1986	1987	1988	1991	1984	1983	1985	1991
Causa terminación	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2
Manto explotado	1 y 2	1 y 2	1 y 2	2	2	2	2	-	1	2	2	
Paragénesis	1	2	2	2	1	2	1	-	1	1	1	1
Recubrimiento (m)	8 a 45	30-50	50-70	70				-	-	60		173
Potencia mantos (m)	40 a 100	60-70	30-40	15			20	-	-	10		92
Cota superior (msnm)	303	434	300	230	230	160	230	200	225	230	105	260
Cota inferior (msnm)	100	240	160	120	201	98	90	167	180	30	-10	-5
Tonelaje estéril (Mt)	66,2	82	83	25,62	8	11,7	-	1,2	33,4	42,2		
Toneleje mineral (Mt)	11,3	18	10	4,4	1	2,0	-	0,2	5,7	7,2		
Extensión (km ²)	0,34	0,31	0,40	0,17	0,08	0,12	0,21	-	0,08	0,29	0,09	0,31
Perímetro (m)	2334	2309	2021	1817	1062	1597	1712	-	1817	428	2429	1303
Corta el N.F.	No	No	No	Si	No	No	Si	-	No	No	Si	No

Paragénesis: 1 = manto piritoso; 2 = manto silicatos. Causa terminación: 1 = agotamiento proyecto inicial; 2 = cierre actividad.
S.V: San Valentín. G: Gloria. G.E: Gloria Este. S.J: San José. B: Brunita. B.O: Brunita Peste. LB: Los Blancos

Tabla 4.4. Estado actual de las cortas explotadas en la Sierra Minera.

Denominación	Fecha vertidos	Material de relleno	Estado actual (agosto-2004)
Los Blancos I	1984 2004	Estéril de descubierta y lodos de flotación	Rellena parcialmente por los estériles de la corta Los Blancos III. Se están vertiendo los lodos de flotación de la balsa Jenny (Sur del Llano del Beal). Feb-Sep 2004.
Los Blancos II	-	107.250	Agua en su interior (m ³).
Los Blancos III	-		Vacía.
Emilia	1995	Algas. Material de construcción.	Reconvertida en vertedero de residuos inertes (RSI).
San Valentín	1985	Estéril de manto	Rellena parcialmente con estériles de la propia corta.
Tomasa	Setbre 1990	Lodos de flotación	Rellena parcialmente con estériles de flotación procedente del lavadero Roberto II, instalado en la propia corta.
Gloria	1984 1997	Estéril de manto. Tierra con hidrocarburos	Rellena parcialmente con estériles de la propia corta y con residuos peligrosos procedentes del Fangal. (Escombreras-Cartagena).
Gloria Este	-		Vacía.
San José	-		Vacía.
Eloy	1984	Estéril de descubierta	Rellena totalmente con estériles de corta Brunita. Actualmente pasa la carretera La Unión-Portman.
Brunita	-	845.325	Agua en su interior (m ³).
Brunita Oeste	-		Vacía.

4.3. RESIDUOS MINERO-METALÚRGICOS

4.3.1. INTRODUCCIÓN

Consecuentemente con el desarrollo y evolución de la actividad minera, en sus más de 22 siglos de historia, en la Sierra de Cartagena-La Unión se han ido acumulando, sobre la superficie del terreno, millones de toneladas de residuos, de muy variadas características físicas y químicas.

Con el fin de conocer la magnitud e importancia de estos residuos, el Ministerio de Industria y Energía realizó en el año 1974, a través del Instituto Geológico y Minero de España (IGME), un Inventario Nacional sobre las Balsas y Escombreras derivadas de la explotación y beneficio de minerales (IGME, 1974b). Este inventario fue revisado y actualizado en el año 1986 (IGME 1986a).

Posteriormente, a raíz del accidente de la mina de Aznalcollar en el año 1998, el Ministerio de Industria encargó al ITGE realizar una nueva revisión del inventario de 1986; con el objetivo, por una parte de determinar sus características físicas y geotécnicas, y por otra la de adaptarlo a la propuesta de Instrucción Técnica Complementaria 08.02.01: depósitos de lodos procedentes de establecimientos de beneficio, aprobada por Orden 26-4-2000, BOE de 9-5-2000. En la Sierra Minera de Cartagena-La Unión, el inventario (ITGE, 1999a) fue realizado, en el segundo semestre del año 1999, por el Departamento de Ingeniería Minera Geológica y Cartográfica de la Universidad Politécnica de Cartagena, siendo el autor de esta tesis uno de los participantes. Se inventariaron 77 balsas de lodos de flotación ubicadas en tierra.

El trabajo realizado para completar el inventario, que se describe a continuación, constituye la base para estudiar la contaminación de las masas de aguas continentales (superficiales y subterráneas) y marinas (Mar Menor y Mediterráneo), y evaluar su potencialidad o riesgo por estabilidad.

4.3.2. METODOLOGÍA EMPLEADA

En primer lugar, se procedió a la recopilación y estudio de información bibliográfica sobre los distintos inventarios realizados por el IGME, ITGE y otros trabajos sobre el área de estudio. Posteriormente, se han cartografiado en campo, sobre los mapas topográficos regionales, a escala 1:5.000, todas las acumulaciones de residuos cartografiados a esta escala. En gabinete, utilizando Autocad-Raster, se han superpuesto, sobre el mapa topográfico de escala 1:25.000, las fotos aéreas correspondientes, y se ha comprobado y mejorado la cartografía realizada (Figura 4.19), auxiliados con los datos de campo, en los cuales se identifican detalles no perceptibles

en las fotos aéreas, por encontrarse algunas áreas de éstos residuos enmascarados por la vegetación.

Además de los depósitos cartografiados, existen multitud de ellos de pequeña dimensión, distribuidos por toda la Sierra Minera, y que no son cartografiados a la escala que se ha desarrollado este trabajo.

Los tipos de residuos diferenciados e inventariados (Tabla 4.5) son los siguientes: (a) estéril de corta, (b) lodo de flotación depositados en tierra (c) lodo de flotación depositados en mar, (d) estéril de concentración gravimétrica, (e) estéril de mina, (f) óxidos, (g) rechazo de granulometría, (h) escoria de fundición y (i) estéril de pozo.

Tabla 4.5. Clasificación de los diferentes tipos de residuos minero metalúrgicos.

Tipo de Residuo	Denominación del Depósito	Acrónimo
Estéril de corta	Vacie	V
Lodo de flotación	Balsa (en tierra)	F
Lodo de flotación	Depositado en Mar	FM
Estériles de concentración gravimétrica	Terrera de gravimetría	G
Estéril de mina	Escombrera	E
Óxidos (gossan o mineral oxidado)	Vacie de óxidos	O
Rechazo de granulometría	Montones	RG
Escoria de fundición	Gacheros	GA
Estéril de pozo	Escombrera	EP

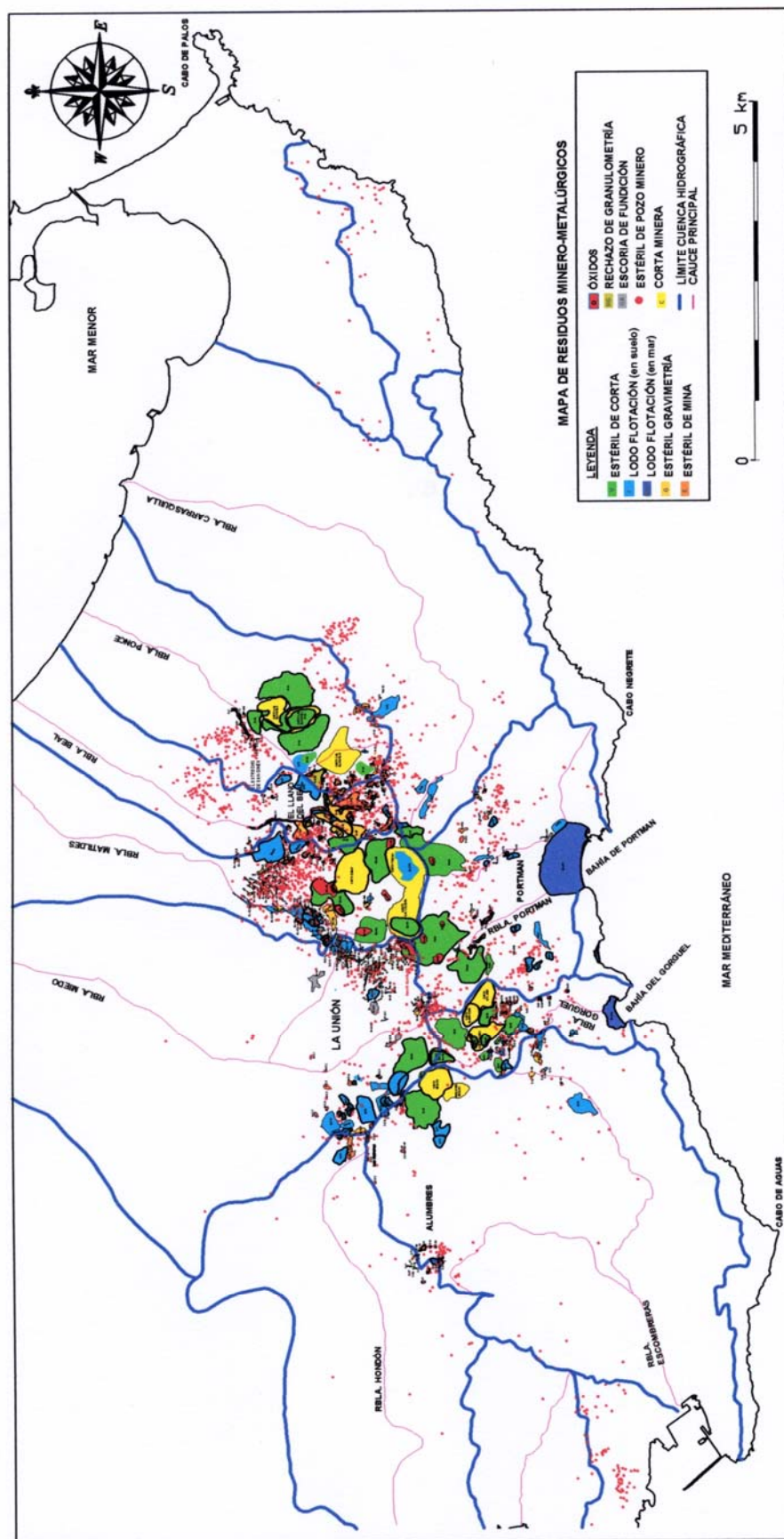


Figura 4.19. Mapa de distribución espacial los distintos residuos minero-metalúrgicos de la Sierra de Cartagena-La Unión. Mapa reducido del original a escala 1:25.000.

4.3.3. CUANTIFICACIÓN DEL ÁREA Y VOLUMEN DE LOS DEPÓSITOS DE RESIDUOS MINEROS

Como resultado del inventario, se han cuantificado 2351 depósitos de residuos (Figura 4.19). Todos los residuos inventariados y cartografiados, se han caracterizado y clasificado de acuerdo a los 9 tipos de materiales diferenciados según su origen (Tabla 4.6). El área total que ocupan los residuos es aproximadamente de 9 km² y su volumen del orden de 175 Mm³ en tierra, y otros 25 Mm³ en el mar (bahías de Portman, el Gorguel y playa la Galera). La columna V/E indica el volumen de residuo almacenado por unidad de superficie. Los vacies son los que ocupan menor extensión en relación con el volumen que almacenan, en tanto que los gacheros son los que se encuentran más extendidos (con menor altura).

Tabla 4.6. Extensión y volumen ocupado por las diferentes estructuras mineras.

Denominación del depósito	Nº Depósitos	Extensión Km ²	Volumen (Mm ³)	V/E
Vacie (V)	32	4,21	135,99	32,30
Balsas de Flotación (F)	89	2,18	22,89	10,50
Flotación Mar	2 ^a	0,83	25,00	30,12 ^b
Terreras de Gravimetría (G)	119	0,65	3,73	5,74
Escombreras de Mina (E)	176	0,48	3,01	6,27
Escombreras de Óxidos (O)	11	0,26	6,93	26,65
Rechazo de Granulometría (RG)	1	0,06	0,59	9,83
Gacheros (G)	19	0,13	0,66	5,08
Escombreras de pozos mineros	1902	0,02	0,51	25,50
Total residuos minero-metalúrgicos	2351	8,83	199,30	22,57
Cortas mineras	12	2,40	0,00	
Total estructuras mineras	2363	11,23	199,30	

Mm³: millones de metros cúbicos. V/E: Relación entre Volumen y Extensión (V/E). ^a: No es un depósito sino una zona afectada. No se ha incluido la playa de La Galera por su escasa dimensión. ^b: Valor no representativo.

Una vez finalizado el inventario y calculados los datos anteriormente citados, se han agrupado los depósitos de residuos según las distintas cuencas hidrográficas de las ramblas que surcan la Sierra Minera, siendo los resultados obtenidos los que se muestran en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7. Distribución de los depósitos de residuos mineros por cuencas hidrográficas de ramblas.

Cuenca hidrográfica de la rambla	Nº depósitos	Superficie Cuenca (km ²)	Extensión Residuos (km ²)	% ocupación cuenca	Volumen (Mm ³)
La Carrasquilla	176	29,01	0,292	1,006	4,54
Ponce	286	11,96	1,263	10,557	44,22
Beal	336	7,69	0,763	9,922	10,08
Matildes	417	17,38	1,663	9,571	47,30
Miedo	312	36,87	1,192	3,233	13,54
Portman	350	10,78	2,253	20,901	63,79
Gorguel	157	3,49	0,741	21,238	10,45
Escombreras	142	26,77	0,561	2,096	4,59
Hondón	56	19,55	0,110	0,565	0,78
Otras	119		0,001		0,00
Total	2351	163,50	8,830		199,30

De la Tabla 4.7 se puede concluir que las ramblas del Gorguel y Portman son las que tienen un mayor porcentaje de afectación del total de su superficie, con prácticamente el 21% en cada una de ellas, seguidas de las de Ponce, Beal y Matildes, todas con una afectación próxima al 10%. Continúan en orden descendente las del Miedo con el 3%, Escombreras con el 2% y La Carrasquilla con el 1%. La rambla con menor afectación es la del Hondón con el 0,5% de su superficie total.

Del total de residuos minero-metalúrgicos, el 60% en volumen se encuentra en las cuencas de las ramblas que vierten al Mar Menor, y el 40% restante lo hacen al Mar Mediterráneo (Capítulo 2, Tabla 2.1).

4.4. MINAS SUBTERRÁNEAS

Durante el periodo de actividad minera de la Sierra de Cartagena-La Unión, la extracción de minerales se realizó, por la mayoría de las empresas explotadoras, mediante el sistema de minería subterránea, empleando fundamentalmente el método de cámaras y pilares. En el año 1957 comienza la extracción a cielo abierto por parte de la empresa SMMPE la cual continuó hasta el año 1968 con el laboreo de interior, mientras que el resto de empresas fueron haciéndolo escalonadamente hasta el cierre total de la minería en la Sierra Minera. Buena prueba de ello lo constituye el hecho de que todos los yacimientos investigados por la citada empresa, detectaron minados de las antiguas explotaciones subterráneas, tal y como se refleja en los cortes geológicos como el de la Figuras 8.3 (ver Capítulos 6, 7 y 8).

Sería imposible hacer un inventario de las minas subterráneas existentes en la Sierra Minera, pero lo que se puede decir es (en base a la experiencia del autor, como participante en las labores de investigación, planificación y explotación de la citada empresa), que es posible definir como zonas de minados, aquellas donde se acumulan los pozos mineros, habiéndose señalado tres en el mapa de la Figura 4.20: Cala Reona, El Llano-La Unión-Portman y La Parreta; pero las principales zonas de minados, coinciden con los yacimientos valorados (reservas de mineral) de la Figura 4.22.

El conocimiento de estas zonas mineras explotadas por minería subterránea, es importante por el riesgo que puede suponer para las personas y hay que considerarlas en la planificación del territorio. Además, asociado a estas áreas se han producido fenómenos de hundimientos (ver Capítulo 8).

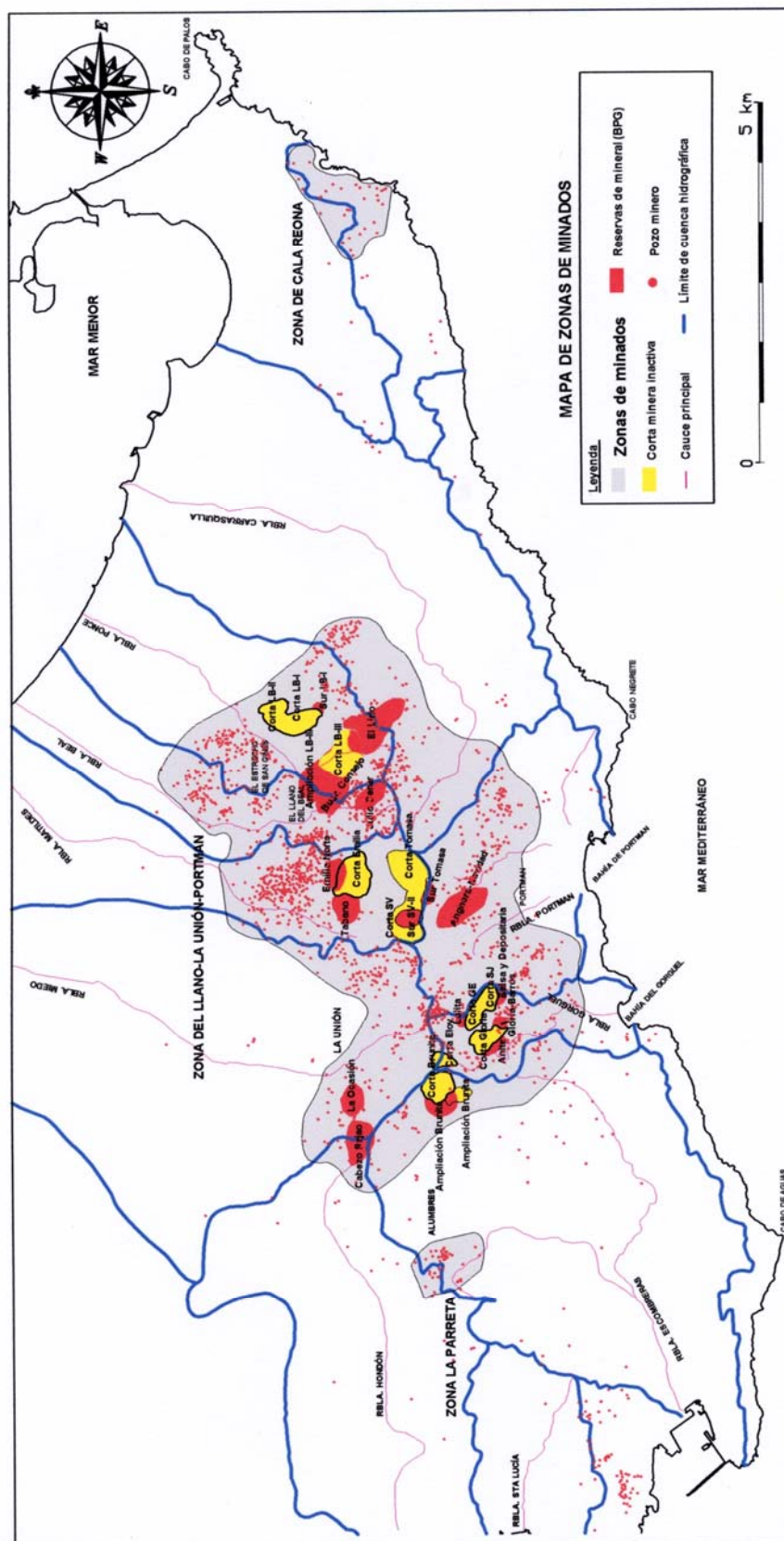


Figura 4.20. Mapa de distribución espacial de zonas de minados de la Sierra de Cartagena-La Unión. LB: Los Blancos; SV: San Valentín; GE: Gloria Este; SJ: San José. Mapa reducido del original a escala 1:25.000.

4.5. CANTERAS

La extracción de rocas industriales es tan antigua como la de menas metálicas. En la Sierra Minera se han explotado: 1- yeso, 2- filitas y 3- calizas y dolomías. En la actualidad, en la Sierra Minera continúan en actividad las que se relacionan a continuación (Figura 4.22).

- Una cantera (denominada El Corral) para la extracción de filitas, con una producción de 7000 ton/año, destinadas a impermeabilizaciones y como arcillas en las cerámicas, ubicada en las proximidades de Santa Lucía (Cartagena).
- Tres canteras para la extracción de áridos de machaqueo, denominadas: El Francis, Provimeco y Las Balsetas; con una producción media anual en conjunto de 2,5 millones de toneladas, y cuyos productos se destinan a la industria de la construcción y obras públicas, para la fabricación de hormigones, aglomerados, morteros y prefabricados (COPVT, 2002).
- Una cantera donde se extraen áridos artificiales, cuyo origen son las escombreras de estériles de la corta Los Blancos, cuya producción es de 100.000 ton/año.



Foto 4.17. Cantera Las Balsetas. Escombreras-Cartagena.



Foto 4.18. Aprovechamiento de los estériles de las vacías de la corta Los Blancos para áridos artificiales.

4.6. RESERVAS DE MINERAL

En el momento del cierre de la actividad minera en la Sierra de Cartagena-La Unión, la empresa Peñarroya disponía de resultados sobre las investigaciones que llevaba a cabo (interrumpidamente desde el año 1950 hasta su cese a principios del año 1990), simultaneadas con la actividad extractiva de las cortas.

En la Tabla 4.8 y Figura 4.21 se resumen las características más significativas de los 15 yacimientos minerales investigados y valorados en la Sierra Minera. La explotación de estos yacimientos supondría la producción de un millón de toneladas de concentrados de galena y blenda. Desde el punto de vista ambiental, se generarían nuevos vacíos con 71 Mm³ de rocas estériles y balsas para los aproximadamente 23 Mm³ de lodos de

flotación; además de los impactos ambientales correspondientes. En la Figura 4.21 se representa el tonelaje de cada uno de los yacimientos.

Los yacimientos denominados Cabezo Rajao y La Ocasión, no se han incluido en la Tabla anterior por no estar al mismo nivel de investigación; tan solo se puede decir que el todo-uno explotable sería del orden de 1 y 0,5 millones de toneladas respectivamente.

Tabla 4.8. Valoración de reservas de mineral de la Sierra de Cartagena. Datos de la empresa SMMPE y elaboración propia.

Rambla	Yacimiento	Superficie			Estéril			Mineral		Leyes		Rendimientos		Producción concentrados		Estériles de flotación		Tipo manto
		km ²	Kt	Mm ³	Kt	Pb	Zn	Pb	Zn	Pb (t)	Zn (t)	Pb (t)	Zn (t)	ton				
Ponce	El Lirio	0,45	15000	5,77	3000	0,7	2,2	70	65	21000	85800	2593200	diseminación					
	Total Ponce	0,45	15000	5,77	3000					21000	85800	2593200						
Lo Poyo	Ampl. Los Blancos III	0,65	67000	25,77	15000	0,7	2,2	81,29	68,87	121935	454542	12923523	diseminación					
	Buen Consejo	0,2	33000	12,69	2050	1,39	3,19	78,31	64,56	31878	84438	1728684,2	1º manto piritoso					
	Sur Los Blancos I	0,02	6000	2,31	200	1,5	3,43	83,8	68,82	3591	9442	166966,47	2º manto					
	Julio Cesar	0,16	12000	4,62	1200	1,39	3,19	78,31	64,56	18660	49427	1011912,7	1º manto piritoso					
	Total Lo Poyo	1,03	118000	45,38	18450					176064	597849	15831086						
Las Matildes	Emilia Norte	0,13	26000	10,00	700	1,62	0,8	70,63	51,26	11442	5741	612817	1º manto piritoso					
	Tábano	0,18	5000	1,92	920	1,62	0,8	70,63	51,26	15038	7545	805416	2º manto					
	Sur San Valentín-II	0,11	6000	2,31	200	1,5	3,43	88,04	65,27	3773	8955	167272	2º manto					
	Sur Tomasa	0,06	2000	0,77	250	1,83	1,29	88,04	65,27	5754	4210	215036	2º manto					
	Total Las Matildes	0,48	39000	15,00	2070					36007	26452	1800541						
Portman	Anghera-Navidad	0,35	6000	2,31	1300	1,6	1,5	88,04	65,27	26160	25455	1118384	2º manto					
	Total Portman	0,35	6000	2,31	1300	1,6	1,5			26160	25455	1118384						
El Gorguel	Lolita	0,04	2500	0,96	250	1,3	2,5	70	40	3250	5000	216750	2º manto					
	Balsa y Depositaria	0,05	2000	0,77	250	1	2,5	70	40	2500	5000	217500	2º manto					
	Gloria Barros	0,04	2000	0,77	400	1	2	70	40	4000	6400	349600	2º manto					
	Anita	0,05	1500	0,58	200	1	2	70	40	2000	3200	174800	2º manto					
	Total Gorguel	0,18	8000	3,08	1100					11750	19600	958650						
Escombreras	Ampl. Brunita	0,14	13000	5,00	800	1,27	3,31	84,71	75,25	12295	39852	667853	2º manto					
	Total Escombreras	0,14	13000	5,00	800	1,27	3,31			12295	39852	667853						
Total Sierra Minera		2,63	184000	70,77	23720					283277	795009	22969714						

Nota: Todos los yacimientos han sido valorados mediante un proyecto de investigación. Kt = miles de toneladas. Mm³ = millones de metros cúbicos

La superficie es estimada, por no disponer de los proyectos.

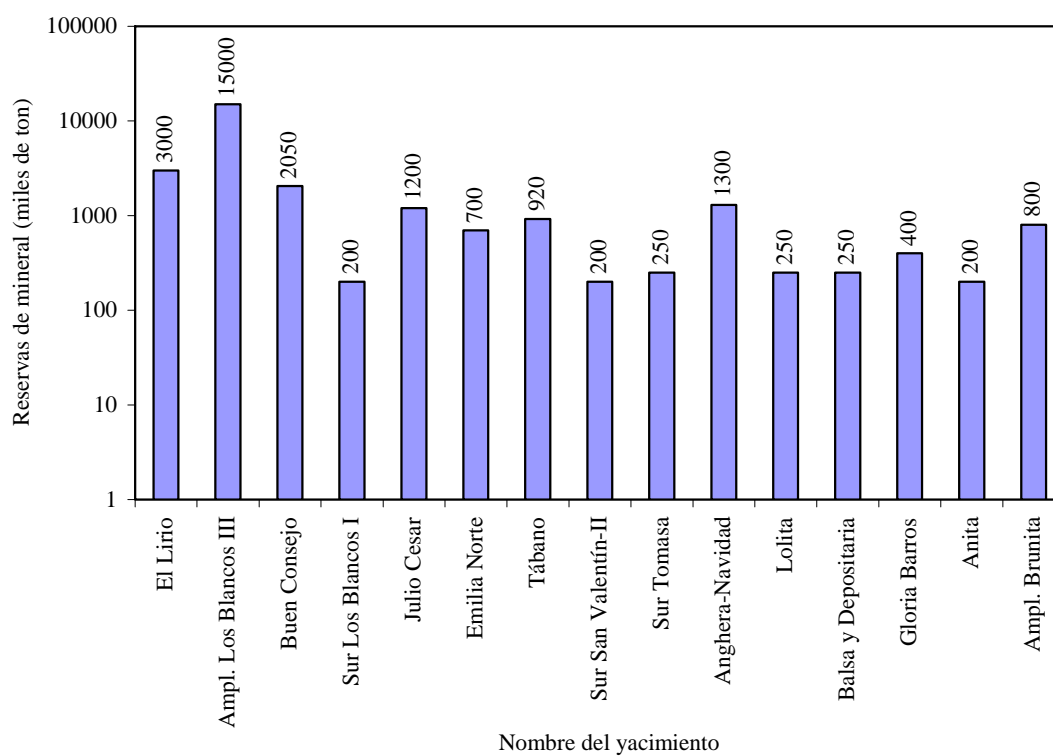


Figura 4.21. Representación gráfica de los yacimientos de mineral Pb-Zn, investigados y valorados, en la Sierra de Cartagena-La Unión. Datos de la empresa SMMPE, y elaboración propia con datos de la Tabla 4.8.

En la Figura 4.22 se han ubicado los citados yacimientos investigados, que como se puede ver, en la mayor parte de los casos, se encuentran a modo de apéndices de las cortas mineras explotadas.

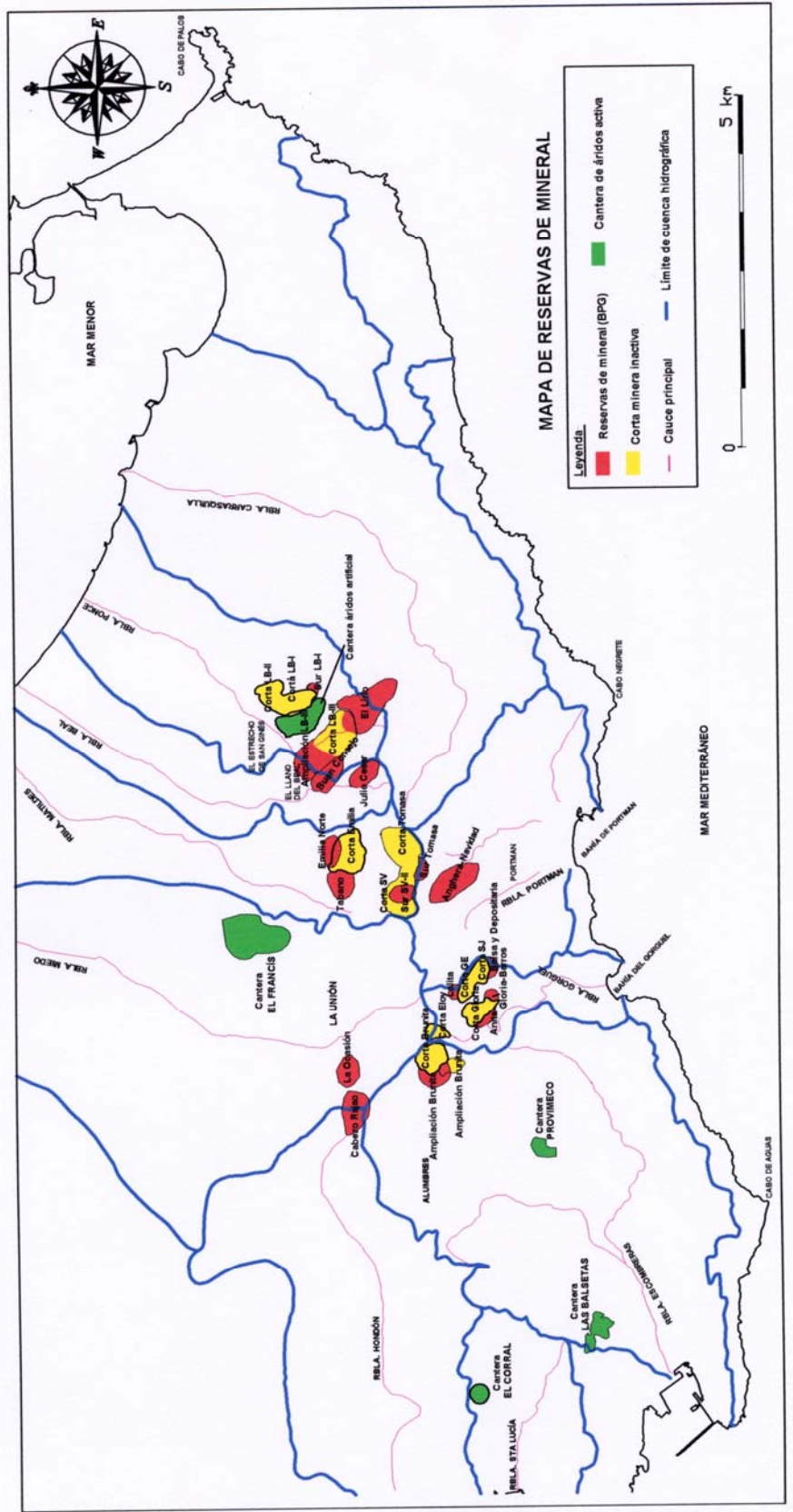


Figura 4.22. Mapa de localización de reservas de mineral (datos de la empresa SMMPE y elaboración propia). Cortas mineras inactivas y canteras de áridos activos. Mapa reducido del original a escala 1:25.000.

4.7. BIENES DE INTERÉS CULTURAL

En el catálogo realizado para la Dirección General de Cultura por Berrocal et al., (2004) se han distinguido, de forma resumida, los elementos patrimoniales que se indican a continuación. En el Anexo puede consultarse el listado completo.

4.7.1. ELEMENTO PATRIMONIAL MINERO

Se han inventariado un total de 160 elementos patrimoniales mineros (Tabla 4.9), denominados como Lugares de Interés Arqueo-industrial Minero (LIAIM). Se han clasificado en 8 tipos distintos: 1-Chimenea, 2-Grupo de minas, 3-Hornos, 4-Castilletes, 5-Lavaderos, 6-Máquinas de tracción de castillete de mina, 7-Polvorines de mina y 8-Túneles.

Tabla 4.9. Elementos del Patrimonio Minero (Berrocal et al., 2004).

Nombre del elemento		Nº de elementos	Totales
Chimenea de	máquina de vapor de mina	9	
	polvorín	1	
	de mina	1	
	fundición	7	
	Sin especificar	2	20
Grupo de minas		2	2
Hornos de	calcinación	25	
	fundición	1	26
Castilletes de	mampostería	25	
	madera	28	
	metálico	10	67
Lavaderos	de flotación diferencial	4	4
Máquinas de tracción de	castilletes de mina	30	30
Polvorines de mina		3	3
Túneles de	acceso a minas	8	8

4.7.2. ELEMENTO PATRIMONIAL GEOLÓGICO

Se han inventariado un total de 28 elementos patrimoniales de interés geológico (LIG), cuyo listado se adjunta en el Anexo.

4.7.3. ELEMENTO PATRIMONIAL ARQUEOLÓGICO

Se han inventariado un total de 98 elementos patrimoniales de interés arqueológico (LIA), algunos de los cuales se encuentran fuera del ámbito de la Sierra Minera, cuyo listado se adjunta en el Anexo.

4.8. DISCUSIÓN

Los inventarios de Estructuras Mineras (EM) constituyen la columna vertebral de esta tesis, ya que a partir de ellos se ha podido:

- Conocer, cartografiar e inventariar el número, tipo y distribución espacial de las estructuras mineras (Figura 4.23), que comprenden: pozos mineros (Figura 4.2), cortas mineras inactivas (Figura 4.22), canteras activas (Figura 4.22), residuos minero-metalúrgicos (balsas y escombreras de materiales estériles) (Figura 4.19) y minas subterráneas (Figura 4.20).
- Conocer, inventariar y localizar los principales drenajes de minas y surgencias de aguas subterráneas.
- Conocer las zonas donde existen aguas subterráneas, que ha permitido realizar la piezometría de la Sierra de Cartagena-La Unión, que hasta ahora no se había hecho en toda el área de estudio.
- Muestrear los puntos de agua superficiales y subterránea para su estudio hidroquímico.
- Muestrear los diferentes materiales geológicos y residuos para la caracterización física, química y mineralógica de cada uno, para poder entender y delimitar los impactos y riesgos que implica cada uno de ellos en el medio ambiente.
- Las estructuras mineras subterráneas no se han podido inventariar debido a que no se dispone de la documentación necesaria para tal fin (Planes de Labores de las minas). No obstante se ha definido el perímetro aproximado donde se encuentran estas labores mineras.

Del inventario y cartografía de los Bienes de Interés Cultural (BIC), se extraen las siguientes conclusiones:

- Conocer el número, tipo y distribución espacial de los distintos elementos que comprenden los Bienes de Interés Cultural, que están asociados a la actividad minera y que se han clasificado en: Lugares de Interés Arqueo-Industrial Minero (LIAIM), Lugares de Interés Geológico (LIG) y Lugares de Interés Arqueológico (LIA) (Figuras 4.23 y 4.24).

El conjunto de todas las Estructuras Mineras (EM) y Bienes de Interés Cultural (BIC), debe ser tenido en cuenta antes de realizar la planificación y ordenación territorial y ambiental de la Sierra de Cartagena-La Unión.

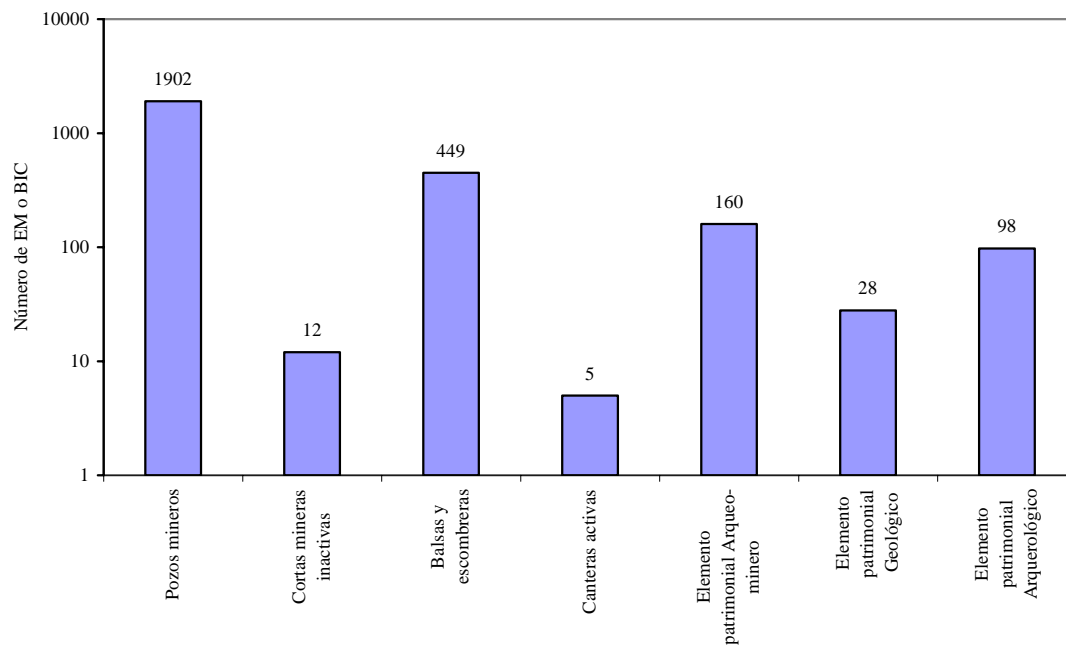


Figura 4.23. Distribución de las Estructuras Mineras (EM) y Bienes de Interés Cultural (BIC) en la Sierra de Cartagena-La Unión.

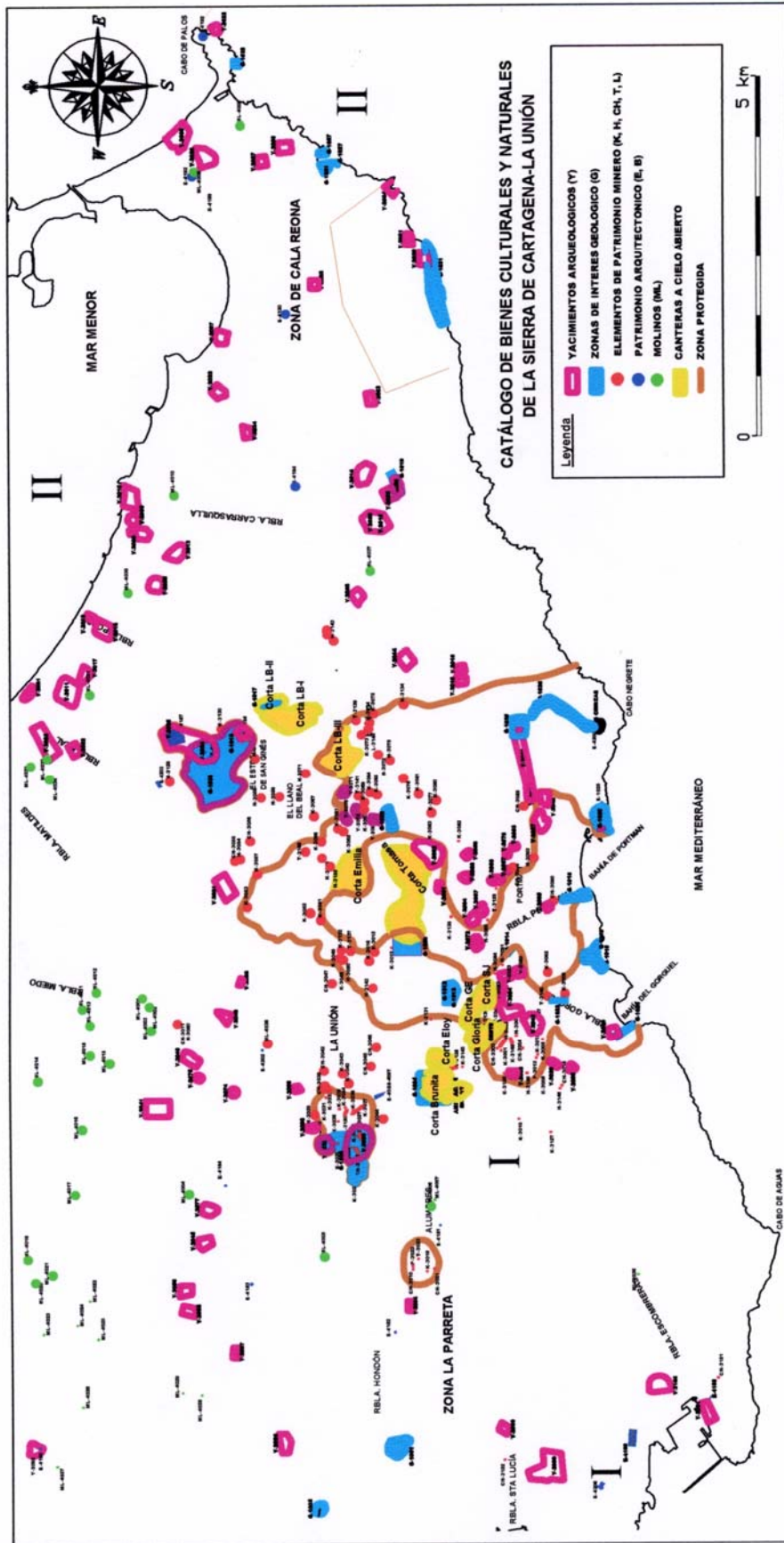


Figura 4.24. Mapa de localización espacial de los Bienes de Interés Cultural y Natural de la Sierra de Cartagena-La Unión. Mapa reducido del original a escala 1:25.000 (Berrocal et al., 2004).

**CAPITULO 5. CARACTERIZACIÓN DE LOS
RESIDUOS MINERO-METALÚRGICOS DE LA
SIERRA DE CARTAGENA-LA UNIÓN**

CAPITULO 5. CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS MINERO-METALÚRGICOS DE LA SIERRA DE CARTAGENA-LA UNIÓN

Los residuos cartografiados e inventariados (Capítulo 4), han sido diferenciados considerando su origen en el proceso minero-metalúrgico, el modo y lugar de depositarlos. Los 9 tipos diferenciados (Tabla 4.5 y Figura 4.19), se caracterizan a continuación. En los Capítulos 7 y 8 se analizan en profundidad los impactos que causan y los riesgos ambientales que pueden suponer cada uno de ellos.

5.1. ESTÉRIL DE CORTA

Son los materiales estériles procedentes del desmonte realizado en una corta minera. Se acumulan en depósitos denominados localmente “vacies”, que corresponde al término de escombreras, los cuales se ubican alrededor de éstas (Fotos 5.1 y 5.2). Se han acopiado a partir del año 1953, en que se inició el laboreo a cielo abierto, hasta su cese definitivo en 1991.



Foto 5.1. Vacies de la corta Los Blancos, al este del Llano del Beal.



Foto 5.2. Vacies de la corta Brunita. Carretera de La Unión a Portman.

5.1.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS ESTÉRILES DE CORTA

Para entender la magnitud y repercusión ambiental, que tienen los materiales estocados en los vacies, en la Tabla 5.1 se resumen algunos datos significativos, tales como su distribución espacial por cuencas hidrográficas, el área que ocupan (4,2 km²) y el volumen almacenado (136 Mm³).

Tabla 5.1. Extensión y volumen ocupado por los vacies de estéril de corta.

Nº de vacies (escombreras)	32
Área ocupada	4,21 km ²
Volumen	136 Mm ³
Granulometría	Diámetro de las partículas entre bloques y bolos
Volumen predominante de los fragmentos de roca	1 m ³ y 1 cm ³
Distribución del número de vacies en cuencas hidrográficas de ramblas	Carrasquilla 1; Ponce 6; Beal 3; Matildes 4; Miedo 2; Portman 5; Gorguel 10 y Escombreras 1

En los estériles de corta se encuentran los diversos tipos de rocas existentes en las diferentes unidades estructurales que conforman la Sierra Minera, y son principalmente los siguientes: calizas, dolomías, doleritas, filitas, esquistos cloríticos, esquistos cuarzo sericíticos, mica-esquistos, mármoles, cuarcitas y esquistos grafitosos.

La composición química de los estériles de corta depende de la composición petrológica de la roca encajante del yacimiento o manto que se explote. En la Tabla 5.2 se resumen los resultados de los análisis químicos de diversas rocas que componen los materiales estériles de las cortas. Se puede apreciar que en todas las rocas hay una pequeña concentración de Pb y Zn, que son dos de los elementos más contaminantes que hay en el suelo, las aguas superficiales y subterráneas de la Sierra Minera, el Mar Menor y el litoral del Mar Mediterráneo en el sector del área estudiada (ver Capítulo 6).

Tabla 5.2. Resultados en % de los análisis de rocas de la Sierra de Cartagena-La Unión. Varios autores.

	Calizas ¹	Dolomías ¹	Doleritas ¹	Filitas ¹	Filitas ²	Filitas ³	Filitas ⁴
Pb	0,06	0,05	0,04	0,03			
Zn	0,21	0,07	0,04	0,02			
Fe (total)	1,58	2,30	14,33	5,22			
Mn	0,11	0,21	0,20	0,05			
S	0,30	0,40	0,58	0,27			
SiO ₂	3,00	3,00	57,00	58,00	58,28	52,90	57,36
Al ₂ O ₃	1,00	<1	12,90	22,60	16,19	24,07	19,12
CaO	50,00	28,90	0,74	0,98	2,87	1,52	2,16
MgO	0,55	20,60	7,80	3,14	4,00	3,86	3,75
K ₂ O	0,09	0,03	0,62	4,10	4,00	4,16	4,05
Na ₂ O	0,04	0,08	1,26	1,37	0,54	1,56	0,92
P.F. (1025°C)	-	44,00	-	-	5,64	5,23	

¹ Empresa Peñarroya: valor medio de 5 muestras. ² De la Fuente, 1982: valor medio de 11 muestras.

³ Solano, 1990: valor medio de 3 muestras. ⁴ Valor medio del conjunto de muestras.

pH: se caracterizan por un pH superior a 6 unidades. De las tres determinaciones hechas en el laboratorio se ha obtenido un valor medio de 6,5.

Peso específico de las partículas sólidas: la determinación se realizó en 2 muestras tomadas en uno de los vacíos de Los Blancos, con un valor medio de 2,95 g/cm³.

Granulometría: Su granulometría es muy variable, con un diámetro comprendido entre 1000 y 1 mm. De acuerdo con la Figura 5.1 se puede apreciar que predominan las partículas tamaño bloques, con una fracción muy pequeña de gravas.

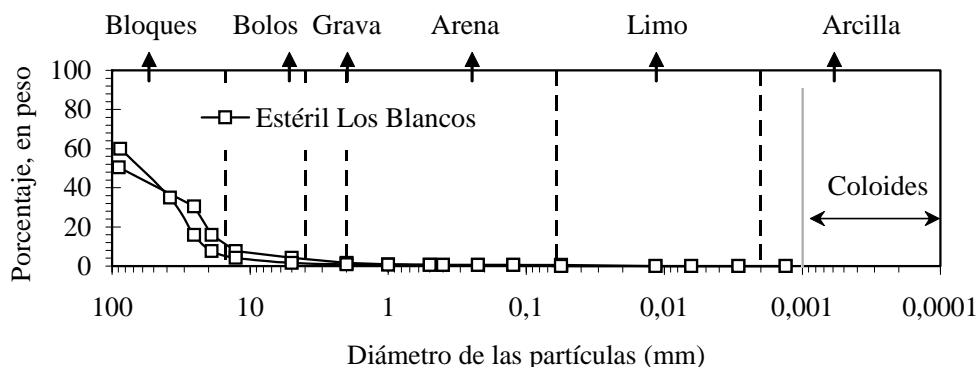


Figura 5.1. Curvas granulométricas de los estériles de corta.

5.1.2. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA

En la Tabla 5.3 se relacionan los principales minerales formadores de los estériles de corta. En ellos se puede apreciar que predominan el cuarzo, caolinita, magnetita y hematites. En el trabajo de De la Fuente (1982) se aportan los minerales mayoritarios que han sido cuantificados en estos estériles, aunque en ningún caso se especifica su porcentaje en peso.

Tabla 5.3. Composición mineralógica de los estériles de corta (% en peso semicuantitativo).

Minerales	Fórmula	Los Blancos
Hematites	Fe_2O_3	5.6
Magnetita	Fe_3O_4	6.1
Arsenopirita	$FeAsS$	Trazas
Esfalerita o blenda	ZnS	2.1
Calcopirita	$FeCuS$	4.2
Pirrotina	$Fe_{1-x}S$	Trazas
Pirita	FeS_2	3.1
Caolinita	$Al_2SiO_2O_5(OH)_4$	9.5
Dolomita	$CaMg(CO_3)_2$	2.3
Calcita	$CaCO_3$	Trazas
Moscovita	$KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	3.2
Cuarzo	SiO_2	20.8
Clorita	$(Mg,Fe)_3(Si,Al)_4O_{10}((OH)_2(Mg,Fe)_3(OH)_6$	2.1
Feldespato cálcico	$CaAl_2Si_2O_6$	Trazas
Feldespato sódico-cálcico	$NaAlSi_3O_8$ $CaAl_2Si_2O_6$	Trazas
Siderita	$FeCO_3$	Trazas
Jarosita	$KFe_3SO_4(OH)_6$	Trazas
Natrojarosita	$NaF_3(SO_4)_2(OH)_6$	Trazas

5.1.3. COMPOSICIÓN QUÍMICA

En la Tabla 5.4 se ha reunido la composición química de los estériles de corta. De las muestras de la corta Los Blancos, en la que se han analizado 22 elementos, se deduce que la concentración de Pb es de 0,6% y la de Zn del 1,35%. Estos altos valores de Zn y

Pb muestran que en los estériles de corta se pueden registrar, puntualmente, altas concentraciones de estos elementos, contenidos en los minerales sulfurosos que lo componen. Además, se reúnen los datos de diferentes autores que han analizado estériles (mayoritariamente filitas) de la Sierra Minera. Se puede deducir que de las muestras analizadas en el trabajo de De la Fuente (1982), hay un mayor contenido de MnO y MgO en las muestras de la Unidad de San Ginés que en las de la Unidad de Portman; lo contrario sucede con el porcentaje de CaO. Comparando estos resultados con los obtenidos por Solano (1990), se deduce que éste ha realizado el muestreo en los estériles de corta que provienen de la unidad de de San Ginés.

Tabla 5.4. Composición química de los estériles de corta (% en peso).

	Óxidos				Elementos		
	1	2	3	4	Los Blancos	Los Blancos	
P.c.	6,56	4,72	5,23	5,20	5,80	P.c.	5,80
MgO	5,78	2,23	4,22	3,86	5,16	Mg	3,11
Al ₂ O ₃	17,56	14,82	24,80	24,07	16,60	Al	8,79
SiO ₂	55,36	61,16	50,36	52,90	40,90	Si	19,12
P ₂ O ₅					0,12	P	0,05
SO ₃					4,48	S	1,79
Cl					0,02	Cl	0,02
K ₂ O	4,47	3,52	4,19	4,16	1,49	K	1,24
CaO	1,69	4,04	1,80	1,52	1,65	Ca	1,19
TiO ₂	0,48	0,47			0,54	Ti	0,32
Cr ₂ O ₃					0,02	Cr	0,01
MnO	0,16	0,05			0,71	Mn	0,55
Fe ₂ O ₃	7,91	6,09	6,90		19,85	Fe	17,87
CuO					0,02	Cu	0,02
ZnO			0,18		1,71	Zn	1,35
As ₂ O ₃					0,04	As	0,03
Rb ₂ O					0,01	Rb	0,00
SrO					0,01	Sr	0,01
ZrO ₂					0,02	Zr	0,01
PbO			0,10		0,61	Pb	0,56
Na ₂ O	0,36	0,73	1,66	1,56	0,14	Na	0,19
BaO					0,04	Ba	0,04
CO ₂	1,26	3,63					

¹ y ²: De la Fuente, 1982: valor medio de 6 muestras de filitas de la unidad de San Ginés y 5 de la de Portman. ³: Solano, 1990.: valor medio de 22 muestras de filitas. ⁴: Peñarroya: valor medio de 3 muestras de la unidad de Portman corta San Valentín). P.c.: pérdidas por calcinación.

5.2. LODOS DE FLOTACIÓN

El Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera (RGNBSM) en su Instrucción Técnica Complementaria (ITC) 08.02.01 “Depósitos de lodos procedentes de establecimientos de beneficio”, aprobada por Orden de 26-4-2000 y publicada en el BOE de 9-5-2000, denomina **Lodo** al producto en forma de pasta, torta o hidromezcla, generado en el proceso de tratamiento, con relación sólido/líquido concreta para cada

caso, y con tamaño de grano generalmente comprendido entre arena y limo (2 a 0,0625 mm). **Balsa de lodo** al conjunto constituido por un hueco en la superficie del terreno, de origen natural o artificial, y por la acumulación de lodos producidos en el proceso de tratamiento de rocas o minerales y depositados dentro de dicho hueco.

5.2.1. DESCRIPCIÓN DE LOS DEPÓSITOS DE LODOS

Según la mencionada ITC, los depósitos de lodos se describirán según los siguientes criterios mínimos:

a) Emplazamiento en el terreno

En la Figura 5.2 (IGME, 1986c), se esquematizan los distintos tipos de implantación de las balsas mineras sobre el terreno. Son tres: a) en exenta sobre terreno llano (Foto 5.3), b) en ladera (Foto 5.4) y c) en valle (Foto 5.5).

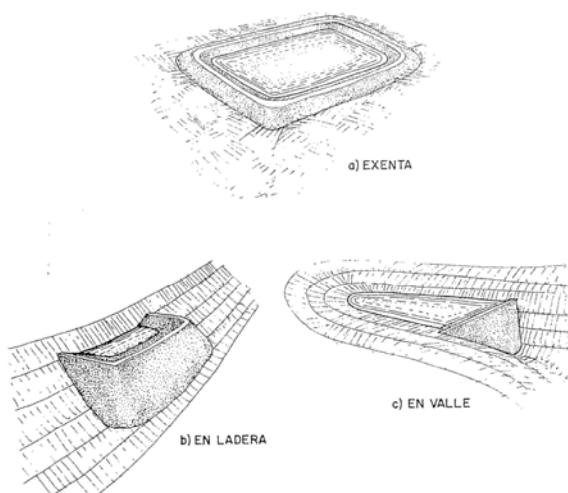


Figura 5.2. Tipos de implantación de balsas mineras en tierra (IGME, 1986c).



Foto 5.3. Emplazamiento en exenta. Portman.

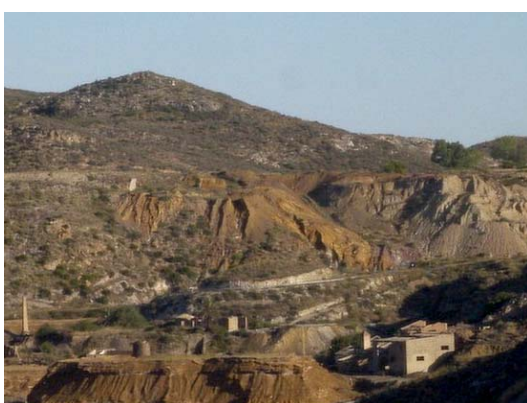


Foto 5.4. Emplazamiento en ladera. Ctra de La Unión al Gorguel.



Foto 5.5. Emplazamiento en valle. El Descargador.

b) Tipo de dique exterior. En el caso de los depósitos de la Sierra de Cartagena-La Unión, no existen diques exteriores en ninguna balsa.

c) Impermeabilización del vaso

El terreno, donde se ubican las balsas inventariadas de la Sierra Minera de Cartagena-La Unión, no está impermeabilizado.

d) Método de recrecimiento. El que se ha seguido en la zona de estudio es el que se describe a continuación.

Una vez elegido el lugar donde se iba a implantar la futura balsa de lodos, se comenzaba, sin que se realizara ningún tipo de impermeabilización, construyendo un cordón de tierra, de aproximadamente un metro de altura. En el caso de implantación en exenta, a lo largo de todo el perímetro de la futura balsa; en la base en el tipo ladera; y en el cierre cuando se trataba de una vaguada (Figura 5.2).

Después se preparaba el sistema de desagüe del agua contenida en los lodos a depositar, para lo cual, en la parte central de la balsa, se construía una chimenea (“pipa” en lenguaje minero) de madera o ladrillo con la que se comunicaban las tuberías que conducían el agua, por gravedad, a una poceta para su recuperación mediante una bomba. A partir de este momento se iba realizando el vertido puntual de los lodos a través de una tubería que, apoyada en un trípode de madera, se situaba dentro de la balsa y descargaba a una altura que oscilaba entre 1 y 2 m en las proximidades de su borde. Esta tubería se giraba para distribuir el lodo en toda la superficie de la balsa. Antes de que el lodo alcanzara el cierre inicial de un metro, se distribuían sobre el borde, cada 4 o 5 m, unos troncos de madera de aproximadamente un metro de altura y pequeño diámetro, 10 a 15 cm. (Foto 5.6), sobre los cuales se colocaban tablones (Foto 5.7) para elevar la balsa otro metro y continuar los vertidos. También se elevaba la chimenea, pero de forma que el agua pudiese seguir entrando hacia el depósito colector.



Foto 5.6. Sistema constructivo de las balsas de lodos. Colocación de troncos para conseguir más altura. Balsa de la mina Santa Antonieta.



Foto 5.7. Colocación de tablones entre los troncos para evitar derrames de lodo. Balsa de la mina Santa Antonieta.

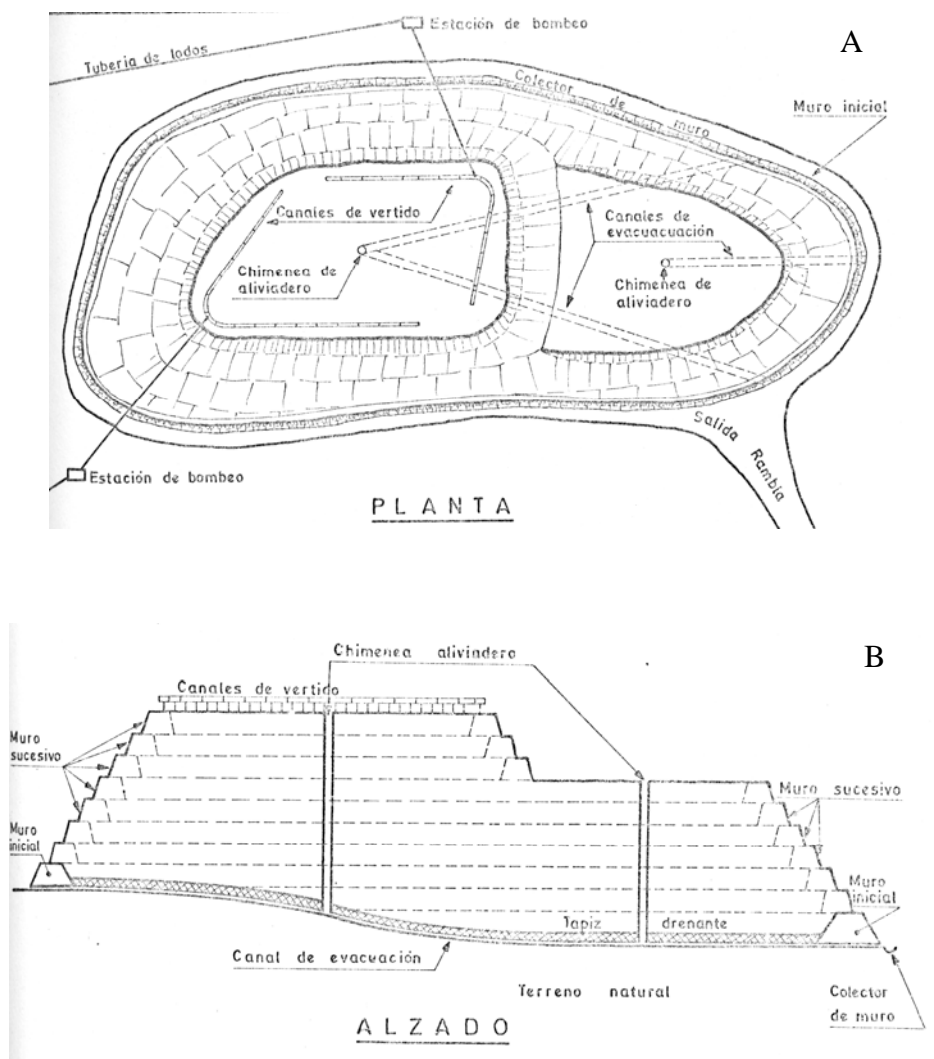


Figura 5.3. Esquema usado en la Sierra de Cartagena-La Unión para la construcción de una balsa de lodos **A**) en planta y **B**) en sección (IGME, 1984).

En la Figura 5.3 se representa el esquema de construcción de una balsa de lodos. Se puede apreciar que el sistema descrito es una simplificación de éste, en muchas de las balsas inventariadas en este trabajo.

En las balsas de la zona del Llano del Beal, el sistema de vertido y transporte se hacía del siguiente modo: desde el lavadero salía una canaleta de madera, que también rodeaba la balsa, estando aquella perforada cada 40 o 50 cm. y estos agujeros estaban provistos de tapones de madera. Al circular el lodo por la canaleta, se destapaban aquellos tapones por los que se deseaba que se depositara el lodo, de manera que abriendo y cerrando tapones, se iba distribuyendo el lodo por el perímetro exterior de la balsa. Cuando el lodo depositado en un lateral estaba llegando a la canaleta, se cerraban los tapones y se hacía el depósito por otro lateral, y así se continuaba hasta que había que elevar la canaleta para seguir realizando el depósito de lodos.

5.2.2. LODOS DE FLOTACIÓN DEPOSITADOS EN TIERRA

Se almacenan en balsas (Foto 5.8) los materiales estériles (lodos) procedentes de los lavaderos de flotación diferencial. La generación de estos lodos tuvo lugar entre los años 1940 y 1991.



Foto 5.8. Balsa de lodos de flotación. Emplazamiento en exenta. Mina San Francisco Javier, carretera del Gorguel.

5.2.2.1. Características de los lodos de flotación en tierra

En la Tabla 5.5 se resumen algunos datos significativos para entender la repercusión, que tienen los lodos de flotación, para el medioambiente, tanto en los impactos que causan como en los riesgos que pueden suponer.

Tabla 5.5. Extensión y volumen ocupado por los lodos de flotación depositados en tierra.

Nº de balsas flotación	89
Área total ocupada	2,18 km ²
Volumen	23 Mm ³
Granulometría	Comprendida entre arena y limo
Distribución del número de balsas en cuencas hidrográficas de ramblas	Carrasquilla 4; Ponce 4; Beal 6; Matildes 11; Miedo 28; Portman 13; Gorguel 9; Escombreras 8 y Hondón 6.

pH: en los lodos de flotación es muy variable y depende del depósito o manto de mineral que se explota. El pH varía desde un rango ácido a alcalino (Figura 5.4). Los lodos de flotación resultante del manto piritoso se caracterizan por un pH ácido ($pH < 6,5$), mientras que si se explotan depósitos ubicados en las zonas de materiales carbonatados el pH presenta valores de neutro ($pH = 6,5-7,5$) a alcalino ($pH > 7,5$).

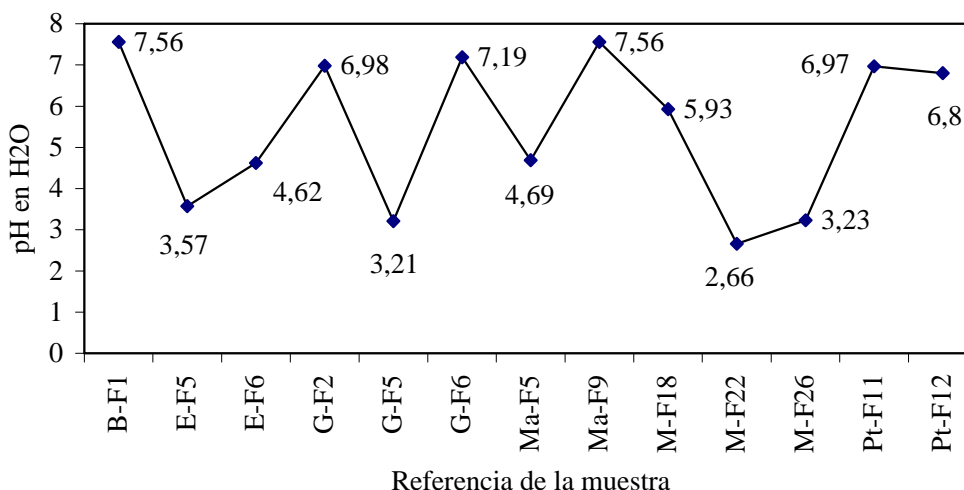


Figura 5.4. Valores de pH de diferentes balsas de lodos de flotación.

Peso específico de las partículas sólidas: la determinación del peso específico realizada en dos muestras tomadas en la balsa Jenny (B-F3), dio un valor medio de 3,11.

Granulometría: esta propiedad se ha determinado en condiciones húmedas y secas. Los resultados de las curvas granulométricas realizadas, se han representado en el gráfico de la Figura 5.5, donde se aprecia que son muy diferentes. Las características granulométricas muestran que, en condiciones húmedas, el material presenta una granulometría limo-arenosa, con predominio de la fracción limo (Figura 5.5a). En el caso de realizar el ensayo en seco, el material presenta una granulometría gravo-arenosa, con predominio de la segunda (Figura 5.5b). Esta diferencia se debe a que el material forma agregados, que en condiciones de secado al aire libre no se rompen y dan un valor erróneo de esta propiedad. Solo se considerará, para el estudio, la granulometría realizada en húmedo (Figura 5.5a). El 80% de las partículas tiene un tamaño comprendido entre 0,4 y 0,01 mm; en tanto que el 50% lo está entre 0,1 y 0,01 mm (Figura 5.5a).

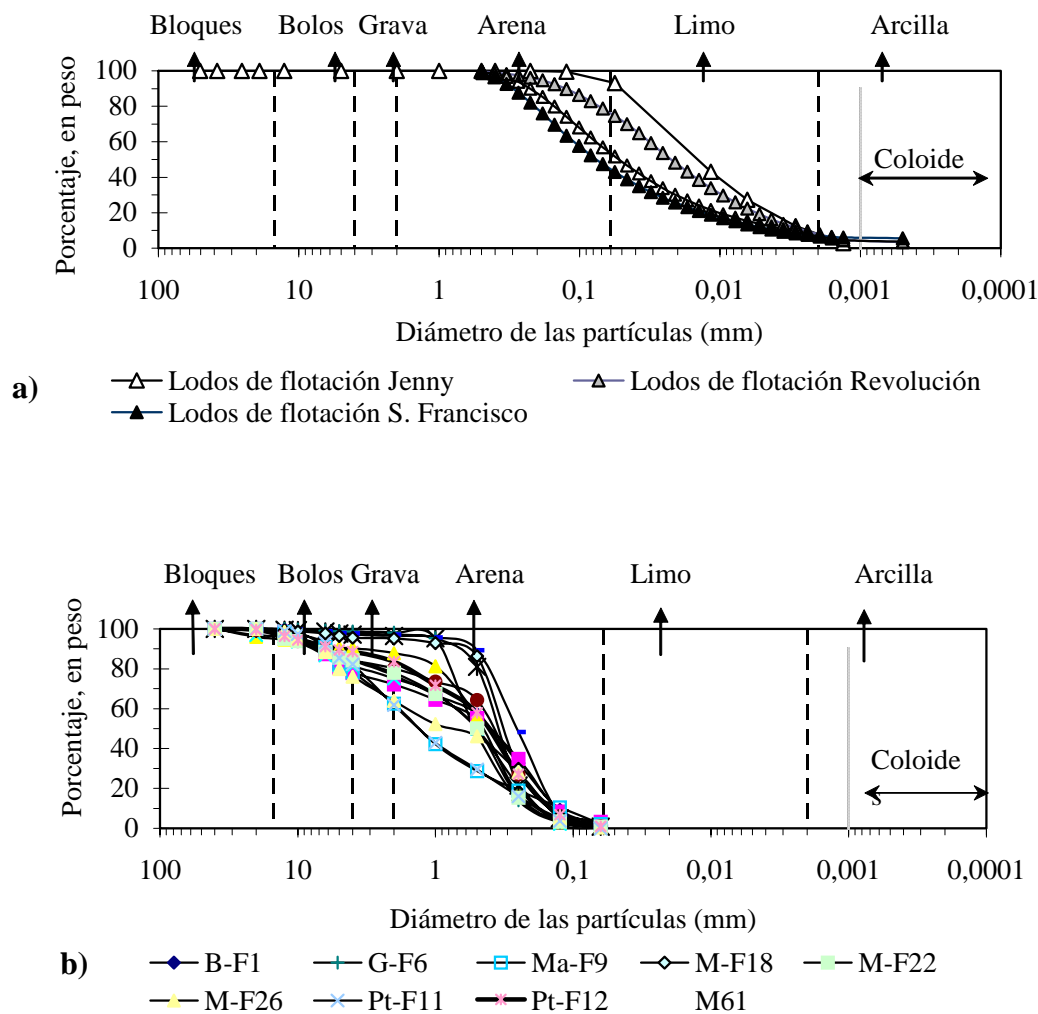


Figura 5.5. Curvas granulométricas de lodos de flotación en tierra, a) en húmedo y b) en seco.

5.2.2.2. Propiedades geotécnicas

En la tabla 5.6a se resumen los valores obtenidos en los ensayos de permeabilidad, aplicando la fórmula de Gil-Gavard, realizados en las balsas de lodos Brunita y Lírío (Faz et al., 2003 a y b).

Tabla 5.6a. Valores de permeabilidad en dos balsas de lodos de flotación (Faz et al., 2003a y b)

Balsa de lodos	Tiempo (min)	Permeabilidad (cm/s)
Brunita	30	$6,59 \cdot 10^{-7}$
	20	$6,96 \cdot 10^{-7}$
	10	$4,75 \cdot 10^{-7}$
Lírío	20	$7,91 \cdot 10^{-5}$
	15	$8,75 \cdot 10^{-5}$
	10	$7,41 \cdot 10^{-5}$

En la Tabla 5.6 se relacionan un conjunto de propiedades geotécnicas de los lodos de flotación. (MOPTMA, 1996). Estos se caracterizan por ser materiales limo-arcillosos, no plásticos. Tanto los parámetros de resistencia como el ángulo de fricción interna son muy elevados, y la cohesión es muy baja o nula.

Tabla 5.6b. Características geotécnicas de los lodos de flotación (MOPTMA, 1996).

Muestra		M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6
Límites de Atterberg	Límite Líquido	24,7	N.P	25,6	N.P	36	N.P
	Límite Plástico	21,8	N.P.	21	N.P.	24	N.P.
	Índice de Plasticidad	2,9	N.P.	4,6	N.P.	12	N.P.
	H.B.R.	A-4 (7)	A-2-4 (0)	A-4 (6)	A-2-4 (0)	A-6 (8)	A-2-4 (0)
	Casagrande	ML	SM	CL-ML	SM	CL	SM
Clasificaciones				Limos y arcillas de baja compresibilidad.			
	Índice de Plasticidad	Limos poco plásticos de baja compresibilidad	Limos arenosos	Limos arenosos. Arcillas plásticas. Limos arenosos	Limos arenosos	Arcillas plásticas	Limos arenosos
Densidad (g/cm ³)		1,67	1,65	1,74	1,72	1,56	1,80
Humedad	Inicial (%)	20,68	22,36	18,25	19,4	23,7	19,30
	Final (%)	28,89	26,13	27,56	20,73	28,88	26,93
Coef. Permeabilidad (cm/s)		2,0 e ⁻⁵	1,8 e ⁻⁴	1,1 e ⁻⁶	3,3 e ⁻⁶	9,1 e ⁻⁷	3,6 e ⁻⁵
Materia orgánica (%)		0,26	0,27	0,51	0,46	0,38	0,19
Proctor Normal	Clasificación	ML	SM	CL-ML	SM	CL	SM
	Densidad (g/cm ³)	1,67	1,66	1,84	1,72	1,57	1,81
	Humedad óptima (%)	20,6	22,6	18,3	19	23,6	19,20
CBR	Humedad compactación (%)	20,65	22,51	18,28	19,45	23,76	19,2
	Humedad final (%)	24,66	23,07	21,83	22,27	28,66	20,38
	Hinchamiento (%)	1,5	-0,07	0,78	-0,03	-0,11	-0,06
	Índice al 100% p.n	8	21,55	16,66	28,11	3,6	12,72
Corte Directo	Clasificación	ML	SM	CL-ML	SM	CL	SM
	Cohesión (kg/cm ²)	0,13	0,1	0,3	0,23	0,1	0,06
	Ángulo de fricción (°)	34	38	32	40	38,5	43

5.2.2.3. Composición mineralógica

En la Tabla 5.7 se puede ver que los principales minerales que forman los lodos de flotación son el cuarzo, hematites, caolinita y pirita. En menor proporción se encuentran la magnetita, galena y clorita, además de trazas de otros.

Tabla 5.7. Composición mineralógica de los lodos de flotación (% en peso semi-cuantitativo).

Minerales	Fórmula	Los Blancos
Hematites	Fe_2O_3	11,4
Magnetita	Fe_3O_4	6,1
Galena	PbS	4,2
Arsenopirita	FeAsS	Trazas
Esfalerita o blenda	ZnS	Trazas
Calcopirita	FeCuS	1,5
Pirrotina	Fe_{1-x}S	Trazas
Pirita	FeS_2	7,1
Caolinita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	9,5
Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	2,3
Calcita	CaCO_3	1,2
Moscovita	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	1,1
Cuarzo	SiO_2	13,2
Paragonita	$\text{NaAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	Trazas
Clorita	$(\text{Mg,Fe})_3(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}((\text{OH})_2(\text{Mg,Fe})_3(\text{OH})_6$	3,1
Feldespato cálcico	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_6$	1,6
Feldespato sódico-cálcico	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_6$	1,7
Siderita	FeCO_3	Trazas
Yeso	$\text{CaSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Trazas

5.2.2.4. Composición química

De los resultados obtenidos en los análisis realizados en las balsas Jenny y Rosa (Tabla 5.8), se puede decir que, en ambas, los elementos mayoritarios son el Fe y la Si, debido a que en la zona se explotaba el manto silicatado, rico en pirita. Los valores de Pb y Zn son algo elevados, sobre todo en la balsa Rosa (1,21% Pb y 1,07% Zn).

Comparando los resultados anteriores con los de Solano, (1990), no se observa ninguna anormalidad.

Tabla 5.8. Composición química de muestras de lodos de flotación en tierra.

Óxidos	Jenny	Rosa	S			Elementos	Jenny	Rosa
	% peso	% peso	% peso	Vmín.	Vmáx.		% peso	% peso
P.c.	6,50	6,80	13,95	6,67	21,70	L.O.I.	6,50	
MgO	2,89	3,57	3,99	0,75	9,54	Mg	1,74	2,15
Al ₂ O ₃	13,70	11,10	14,27	6,60	23,54	Al	7,25	5,88
SiO ₂	34,80	30,40	32,43	16,50	48,70	Si	16,27	14,21
P ₂ O ₅	0,08	0,08				P	0,03	0,04
SO ₃	8,42	7,60				S	3,37	3,04
Cl	0,03	0,27				Cl	0,03	0,27
K ₂ O	1,65	0,80	2,29	0,86	5,50	K	1,37	0,66
CaO	3,13	5,07	3,67	0,89	9,32	Ca	2,25	3,65
TiO ₂	0,29	0,34				Ti	0,18	0,20
Cr ₂ O ₃	0,02	0,02				Cr	0,01	0,01
MnO	0,90	1,13				Mn	0,70	0,88
Fe ₂ O ₃	25,67	35,77	19,21	13,20	26,35	Fe	23,11	32,20
CuO	0,03	0,04				Cu	0,02	0,03
ZnO	0,99	1,36	2,27	0,10	7,52	Zn	0,78	1,07
As ₂ O ₃	0,07	0,13				As	0,05	0,10
Rb ₂ O	0,01	0,00				Rb	0,01	0,00
SrO	0,01	0,01				Sr	0,01	0,01
ZrO ₂	0,01	0,01				Zr	0,01	0,01
PbO	0,55	1,33	0,83	0,15	4,53	Pb	0,50	1,21
Na ₂ O	0,14	0,36	1,23	0,15	3,15	Na	0,10	0,27
BaO	0,04					Ba	0,04	
S _{total}			4,80	0,90	11,10			

Jenny (B-F3). Rosa (B-F1). S: Solano, 1990 (valor medio de 16 muestras). P.c.: pérdidas por calcinación.

En los análisis realizados (julio 2003) en varias muestras de lodos (Tabla 5.9), los resultados de los metales Pb y Zn son algo más bajos que los de la Tabla 5.8.

Tabla 5.9. Contenido en metales de lodos de flotación. Concentración en ppm.

Muestra	Cd	Pb	Cu	Zn	Mn
B-F1	2,66	1500	6,12	1980	2750
B-F3 (Jenny)	2,47	992,42	11,52	1300	646,92
B-F6	3,84	913,33	5,37	2756	1278
San Francisco (G-F7)	-	1310	26,5	1210	-
Revolución (M-F15)	-	1700	14,8	6500	-
Jenny (B-F3)	-	2800	15,9	7200	-
Valor medio	2,99	1535,96	13,37	3491,00	1558,31
Valor máximo	3,84	2800,00	26,50	7200,00	2750,00
Valor mínimo	2,47	913,33	5,37	1210,00	646,92

5.2.2.5. Estructuras sedimentarias identificadas en las balsas de lodos

Aunque los lodos de flotación son de origen antrópico y su proceso de formación es muy diferente al de los sedimentos naturales, se han detectado estructuras sedimentarias y se han analizado con los mismos criterios de la estratigrafía convencional (Rodríguez

et al., 2003a). Esto es asumible pues, en las balsas de lodos, los materiales que han sedimentado presentan características muy similares a los de las rocas sedimentarias.

a) Turbiditas

Puesto que el vertido a las balsas se realiza en estado fluido sobre una zona de suave pendiente, aquel se manifiesta de la misma manera que un sedimento que se mueve en el fondo de una cuenca de sedimentación, por la acción de corrientes de turbidez, de ahí que se originen estructuras similares a las turbiditas de origen natural.

Los ejemplos que se han detectado cumplen con todos los requisitos de textura y estructura que describen Bouma (1962) y Einsele (1982). En efecto, se trata de materiales depositados por la acción de corrientes de turbidez que consisten en alternancias litológicas (en este caso, areniscas poco consolidadas y arcillas) rítmicas, con una estratificación muy regular, superficies de estratificación planas (especialmente la basal) y estructura interna de las areniscas que viene caracterizada por una sucesión vertical de estructuras sedimentarias primarias, que se denomina secuencia de Bouma.

En general, en una secuencia completa se diferencian cinco intervalos: a) masivo o con grano clasificación, b) laminación paralela inferior, c) ripples de corriente y/o convolutes lamination, d) laminación paralela superior y e) lutita o pelita. Sin embargo, en este caso se trata de secuencias incompletas (no da tiempo a que se generen todos los términos, pues los vertidos eran muy frecuentes), que lo son más a medida que nos situamos hacia el centro de la balsa-cuenca; en efecto, próximo a los bordes la serie es b, c, d y e y en el centro de la balsa d y e, siendo la más frecuente c, d y e. El término a siempre está ausente y ésto es así porque, como se ha dicho, el vertido es sedimentológicamente muy homogéneo y carece de elementos de la clase rudita.

Se han identificado las tres facies que considera Bouma:

Facies de pendiente. Se depositan en una pendiente de hasta 10°. Se localizan en la parte más proximal de la balsa-cuenca (borde) y lógicamente no existen estructuras de tipo *grain flow*, pero sí es muy frecuente el **cross bedding** (debido a que se trata de una corriente de bajo flujo) y estructuras erosivas, como los paleocanales, amalgamaciones y unas muy peculiares que definimos aquí y que se han denominado **elipsitas**.

Las **estratificaciones cruzadas** son festoneadas (Foto 5.9), que indican superposición de corrientes con distintas direcciones y tienen dimensiones decimétricas, que van desde 5 a 20 cm.



Foto 5.9. Estratificación cruzada festoneada, indicando superposición de corrientes con distintas direcciones. Balsa La Peraleja.

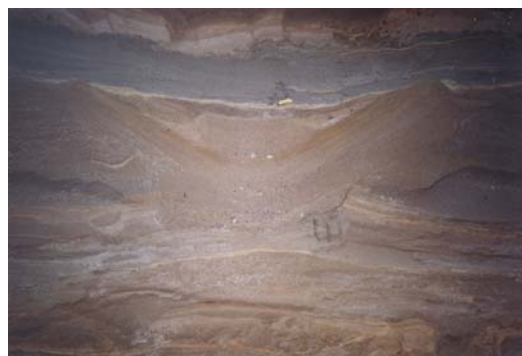


Foto 5.10. Paleocanales. Balsa La Peraleja

Los **paleocanales** (Foto 5.10) los hay que tienen una sección cóncava hacia arriba clásica (en la parte más baja de éstos es donde únicamente se ha apreciado un **graded bedding** rudimentario) y son frecuentes las amalgamaciones (dos capas separadas por un nivel de erosión que llegan lateralmente a fundirse en una sola); pero también son frecuentes los paleocanales con sección geométrica lineal, debido a que cuando sobrevino una corriente superior, el sedimento infrayacente aún no estaba consolidado y la fuerza del vertido seccionó un trozo del estrato aún blando y se lo llevó a otro lugar.

Las **elipsitas** tienen forma de elipse y el eje mayor indica la dirección del flujo del lodo dentro de la balsa (Fotos 5.11).



Foto 5.11. Elipsita. Balsa La Peraleja



Foto 5.12. Elipsita. En la base muestra un contacto erosivo. Balsa La Peraleja

Se parecen a las areniscas almohadilladas, pues también son truncadas en su techo, pero a diferencia de estas últimas, su muro no es concordante con los materiales infrayacentes, sino que presenta un contacto erosivo (Fotos 5.12).

Se tratan de cauces o pequeños cañones en el borde de las balsas, con umbrales y surcos erosivos generalmente elipsoidales, longitudinales al cauce (también los hay circulares (Fotos 5.13 y 5.14), que, lógicamente no sirven para deducir la dirección de la corriente), que se han ido rellorando de capas sucesivas de sedimento y que en una etapa posterior

han sido cubiertos por sedimentos suprayacentes tipo "manta", con acción erosiva. Lo que vemos ahora son precisamente los surcos de "capas de cebolla" (los umbrales han sido erosionados) discontinuos pero alineados, que tienen una anchura bastante constante de 1 a 1,5 m y longitud variable (depende del grado de erosión anterior a la deposición del canal) de 2 a 3 m.



Foto 5.13. Elipsitas circulares. Balsa La Peraleja.



Foto 5.14. Elipsita circular, con surcos en capa de cebolla. Balsa La Peraleja.

Facies proximales. Las turbiditas que pertenecen a este tipo se han depositado en una zona proximal o de margen (a partir de los 10 m del borde de la balsa-cuenca), aunque ya en un fondo casi plano (ángulo inferior a 5°) y los estratos son paralelos entre sí.

Son igual de frecuentes los niveles de areniscas de grano medio que los de arcillas y dentro de la secuencia de Bouma dominan los tipos c, d y e, estando representado en el c convolutes en vez de ripples.

Las **convolutes lamination** o convolutes bedding (laminaciones convolutas o contorsionadas) se presentan dentro de los niveles areniscosos con tamaño medio de grano correspondiente a la arena fina o muy fina (1/4 a 1/6 de mm). Constituyen estructuras complejas constituidas por pliegues disarmónicos, normales y en cofre (Fotos 5.15), generalmente volcados en dirección al sentido de flujo (hacia el interior de la balsa). Las crestas o valles superiores están siempre decapitados por láminas poco o nada deformadas suprayacentes.



Foto 5.15. Convolute lamination. Balsa San Lorenzo (Cabezo Rajao).

En la base de los estratos de material tipo areniscoso son frecuentes los **flute cast**, que son protuberancias de forma irregular que, cuando tienen forma alargada y asimétrica, su eje mayor hacia el flanco de mayor ángulo indica incluso el sentido de la corriente. Esto ocurre cuando debajo de una arenisca existe un estrato de lutitas menos denso y más blando. Sus dimensiones son relativamente pequeñas (1 a 5 cm de ancho por 3 a 10 cm de largo).

Lowe (1975) considera que, en las cuencas sedimentarias de origen natural, estas estructuras de carga se forman como respuesta a inestabilidades gravitacionales creadas por el depósito de sedimentos relativamente densos sobre otros de menor densidad. La diferencia de viscosidad entre los dos estratos aludidos (areniscas y lutitas) es igualmente un factor importante (Anketell, Cegla y Dzulynski, 1970).

Vera (1994) considera que las inestabilidades gravitacionales aludidas pueden ser debidas a factores penecontemporáneos del depósito o a fenómenos ligados al escape de agua de los sedimentos durante su consolidación; en nuestro caso la inestabilidad ya viene impuesta desde el principio, al obligar al sedimento a circular ya que es vertido en una zona de pendiente suave.

Facies distales. Son las que se encuentran en el centro de las balsas, en las que suele localizarse una pequeña laguna estacionaria con agua muy ácida ($\text{pH} = 1-2$), de color generalmente rojizo debido a su alto contenido en Fe y Mn. Los materiales que se depositan aquí se corresponderían con los de las facies pelágicas. Se trata de series fundamentalmente arcillosas con secuencias tipo d y e. Los estratos son muy finos (milimétricos) y su alternancia litológica recurrente recuerda a las ritmitas.

Se han identificado en el techo de los estratos arcillosos gotas de lluvia y mud crack o grietas de retracción, fosilizadas y actuales, lo que demuestra que las balsas de residuos sufren los procesos de sedimentación y desecación similares a las de una cuenca sedimentaria continental.

Los **mud crack** (grietas de desecación, fosilizadas o no) corresponden a grietas cerradas en polígonos de cuatro a cinco lados, de entre 10 y 50 cm de longitud. Estas grietas, con perfil en V, pueden estar rellenas del mismo material que el barro afectado o bien de otro con distinta naturaleza y color, que imprimen al enrejado un bello aspecto pictórico.

En la Foto 5.16 se deduce que tras haberse relleno las grietas, en una primera fase, con material cuprífero fluido (azul), la retracción continuó y, en una segunda fase, fueron rellenas por material férrico (marrón). Los minerales arcillosos constituyentes del fango del área central, que se inunda y se seca recurrentemente, retienen gran cantidad de agua, primero, y luego la pierden por evaporación, disminuyendo de esta manera su volumen, contrayéndose y por último agrietándose. En la Foto 5.17 se pueden ver grietas de desecación actuales que se van ya relleno de un sedimento salino (blanco).



Foto 5.16. Mud crack. Grietas rellenas. Balsa La Peraleja.



Foto 5.17. Mud crack. Grietas abiertas que se están relleno. Balsa La Peraleja.

Las **huellas de gotas de lluvia** (fosilizadas o no) presentan siempre unas formas muy circulares y homogéneas, lo que indica que la lluvia cayó vertical y ausente de viento sobre un fango algo consolidado; su diámetro puede llegar a tener 2 cm, hecho que se interpreta como que la lluvia que originó las huellas tendría que tener gran intensidad. Vienen relacionadas con los mud crack y, a diferencia de las rocas antiguas, en las que generalmente se encuentran los moldes en el muro de la roca suprayacente, aquí se ha encontrado en estratos situados a varios centímetros bajo el suelo el positivo de las huellas, con concavidad hacia arriba (Foto 5.18), lo que indica que entre lluvia y lluvia debió transcurrir un tiempo relativamente largo, como para que se pudieran consolidar las formas. La zona donde están las balsas se caracteriza por escasa lluvia y generalmente de gran intensidad. En la Foto 5.19 aparecen unas huellas cóncavas hacia arriba, recientes pero no actuales, como se demuestra que las grietas de desecación estén ya rellenas.



Foto 5.18. Gotas de lluvia con concavidad hacia arriba. Balsa La Peraleja.



Foto 5.19. Gotas de lluvia recientes, con concavidad hacia arriba. Balsa La Peraleja.

Las características que definen a estas turbiditas antropogénicas son prácticamente las mismas (faltaría el término *a*, debido a que se trata de un sedimento especial) que presentan otras de origen natural continentales, como las lacustres mio-pliocenas originadas por la tectónica diapírica, estudiadas en Finestrat (Alicante) y Jumilla (Murcia) por Rodríguez Estrella (1983) y Mancheño y Rodríguez Estrella (1985), respectivamente.

b) Estructuras de inyección o intrusión

Se han identificado todas las estructuras que consideran Dzulynski y Walton (1965): diques y filones de arena, volcanes de arena y polígonos de arena.

Los **diques y filones de arena** son cuerpos de areniscas de forma irregular (pero lineal) que cortan a una serie de estratos. Su espesor es de 5 a 10 cm y su altura de 1 a 3 m. Generalmente parten de un nivel arenoso inferior y terminan en un arcilloso superior. Se trata de estructuras de intrusión y no de diques rellenos desde el techo, por las siguientes razones:

- a) El espesor va decreciendo hacia arriba.
- b) Los estratos encajantes (especialmente los basales) sufren un arrastre local hacia el dique (Foto 5.20).
- c) En algún caso se han identificado, en el techo de las balsas, **polígonos de arena** o mud-crack. Estas se presentan en forma de unas crestas arenosas (de distinta naturaleza y color que el techo arcilloso de la balsa), que originan formas poligonales en superficie, y en profundidad. Se trata ni más ni menos que de los diques anteriormente referidos (Foto 5.21).



Foto 5.20. Dique de arena cortando estratos. Balsa San Lorenzo (Cabezo Rajao).



Foto 5.21. Dique de arena cortando estratos. Se manifiestan en la parte superior de la balsa a modo de crestas. Balsa San Lorenzo (Cabezo Rajao).

Aunque las direcciones de los diques (y mucho más las de los pertenecientes a los polígonos) es diversa, sin embargo se ha observado que existe un predominio de las N120-160E y N40-70E, que se corresponden con las fracturas neotectónicas y activas de la Región de Murcia (ver Capítulo 2, Figuras 2.20 y 2.21).

En los bordes de las balsas (solo en la superficie) se han identificado algunos escasos ejemplos de **volcanes de arena**, en donde una arena blanco-amarillenta ha abombado (Foto 5.22) o ha perforado (Foto 5.23) una delgada cobertera lutítica (Dzulynski y Walton, 1965) marrón-rojiza de apenas 50 cm de espesor. Presentan una forma de cono volcánico, cuyo diámetro es inferior a 1 m (30 a 60 cm). Su génesis está ligada a los diques de arena.



Foto 5.22. Volcán de arena abombado. Balsa La Peraleja.



Foto 5.23. Volcán de arena perforado. Balsa La Peraleja.

Todas estas estructuras de inyección deben iniciarse por la acción de un terremoto, que origina ciertas fracturas y por ellas se inyecta la arena. Hay que aclarar que aquí no es necesario que el seísmo licuefacte a las arenas, ya que éstas todavía se encuentran en estado de licuefacción cuando se inicia el proceso; por otro lado, en la comarca, a pesar de ser sísmica, no se han registrado seísmos superiores a 7 grados de magnitud en la escala Richter (el máximo es de 5, con epicentro a 10 Km. al Norte de La Unión, Figura 2.22), que es lo que se necesita para que se produzca el fenómeno de licuefacción en un terreno consolidado. Lo que sí es cierto que estamos situados en una zona en la que existe la influencia de una gran falla sismo tectónica que atraviesa la Región de Murcia de Norte a Sur, denominada de la Vega Alta del Segura (Rodríguez Estrella, 1979) y que recientemente (2-5-98) un seísmo localizado en su traza provocó el hundimiento de la mina abandonada de "Lo Veremos" y la subsidencia de hasta 0,5 m en el Oeste de La Unión, con las consiguientes consecuencias negativas en las edificaciones (Rodríguez Estrella et al., 2002b).

5.3. LODOS DE FLOTACIÓN DEPOSITADOS EN EL MAR

Los 60 millones de toneladas de todo-uno extraídos en las cortas mineras por la Sociedad Minera Metalúrgica Peñarroya-España (SMMPA), durante los años 1957 a 1990, fueron tratados en el Lavadero Roberto (Foto 5.24), situado en la bahía de Portman (La Unión-Murcia), de ahí que aparezcan hoy en el mar.

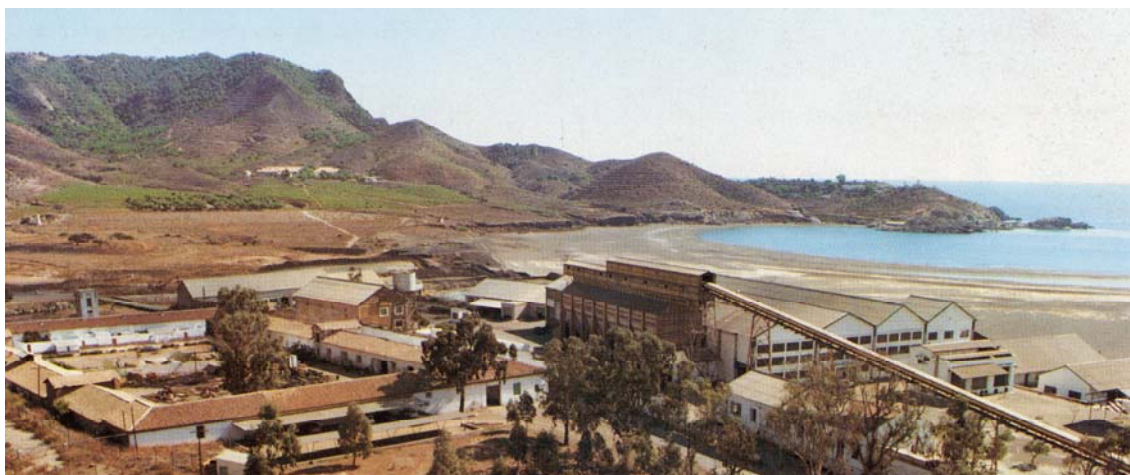


Foto 5.24. Vista general del lavadero Roberto en Portman (La Unión-Murcia), en el fondo a la derecha puede apreciarse la Bahía colmatada (Foto año 1980).

La puesta en marcha del lavadero tuvo lugar en julio de 1957, con una capacidad de tratamiento de 1000 t/día, aumentando paulatinamente hasta alcanzar las 8000 t/día.

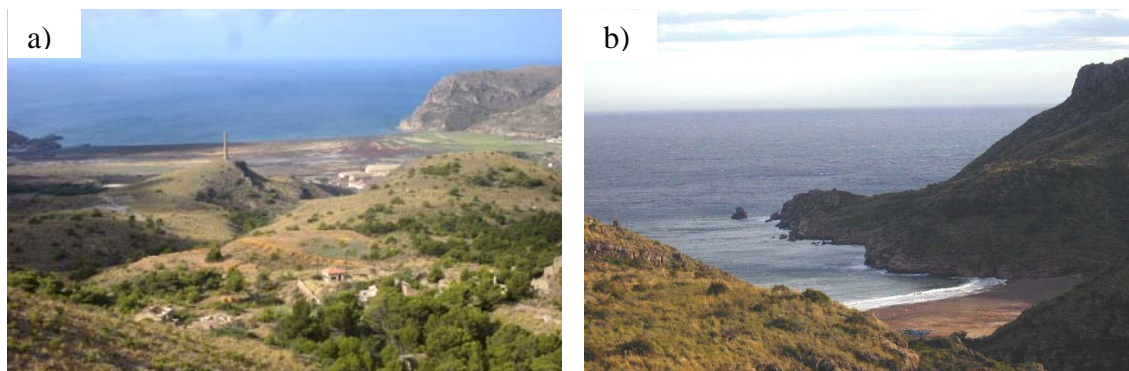


Foto 5.25. a): Playa antrópica en la bahía de Portman, creada por el vertido directo al mar de los lodos del lavadero Roberto, propiedad de la S.M.M.Peñarroya-España, durante los años 1957 a 1991. **b):** Playa antrópica en la bahía del Gorguel, creada por el mismo material y empresa que la de la Foto anterior.

5.3.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS LODOS VERTIDOS EN EL MAR

Durante el tratamiento de los 60 millones de toneladas, se produjeron unos 25 millones de m³ de estériles, los cuales fueron vertidos al Mar Mediterráneo. Como consecuencia de los vertidos, se han creado playas antrópicas de lodos en las bahías de Portman (Foto 5.25a), el Gorguel (Foto 5.25b)) y la playa de la Galera, de 0,72, 0,10 y 0,04 km² respectivamente, representando en su conjunto 0,83 km².

Tabla 5.10. Extensión y volumen ocupado por los lodos de flotación vertidos al Mar Mediterráneo.

Nº de zonas afectadas en tierra	3 (Portman, Gorguel y La Galera)
Área total ocupada	0,83 km ²
Volumen	25 Mm ³
Granulometría	Comprendida entre arena y limo
Distribución del número de playas en cuencas hidrográficas de ramblas	Portman 2 y Gorguel 1.

pH: estos lodos presentan un rango de pH muy amplios, en ellos se pueden encontrar valores desde muy ácidos (pH=2) a alcalinos (pH>7,5). Los valores ácidos responden a los lodos que se encuentran expuestos al contacto con los agentes atmosféricos en la bahía de Portman y el Gorguel, mientras que los valores alcalinos corresponden a los lodos que se encuentran sumergidos en el fondo marino o están en contacto con el oleaje.

Granulometría: en la Figura 5.6 se han representado las curvas granulométricas de dos muestras tomadas en las bahías de Portman y del Gorguel. Presentan una granulometría limo-arenosa, con predominio de la fracción arena (80%), frente al limo (20%), y que en

ocasiones llega a grava y más gruesa. Si se compara con el gráfico obtenido para los lodos vertidos en tierra (Figura 5.5), se observa que estos son más limosos. Esto se explica por el hecho de que las partículas más finas de los lodos vertidos al mar han sido arrastradas por la corriente marina hacia la profundidad.

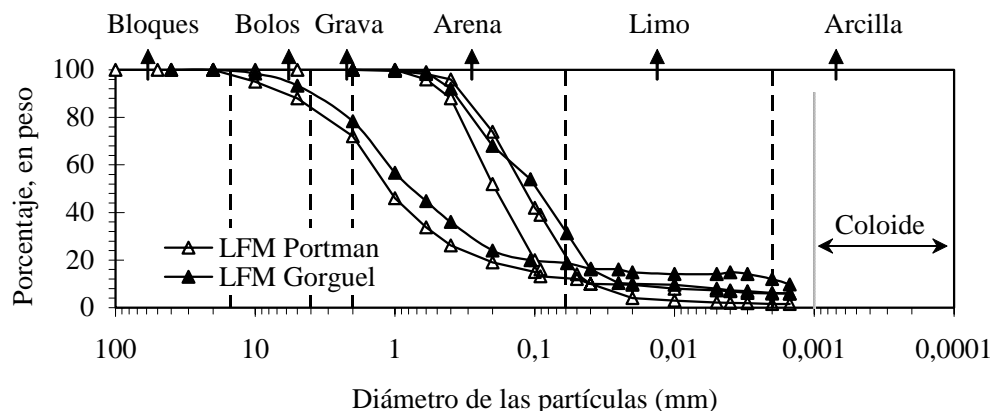


Figura 5.6. Curvas granulométricas de lodos de flotación vertidos al mar (LFM) en las bahías de Portman y del Gorguel en el Mar Mediterráneo.

5.3.2. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA DE LOS LODOS VERTIDOS AL MAR

Estos materiales están formados por varias fases minerales, en la que el mineral predominante es el cuarzo seguido de la caolinita, hematites, pirita y magnetita. En menor medida aparecen la clorita, moscovita, calcopirita, blenda; así como trazas de otros minerales (Tabla 5.11).

Tabla 5.11. Composición mineralógica de los lodos de flotación depositados en el mar (% en peso semicuantitativo).

Minerales	Fórmula	% en peso
Hematites	Fe_2O_3	6,6
Magnetita	Fe_3O_4	4,1
Galena	PbS	Trazas
Arsenopirita	$FeAsS$	Trazas
Esfalerita o blenda	ZnS	1,2
Calcopirita	$FeCuS$	1,2
Pirrotina	$Fe_{1-x}S$	Trazas
Pirita	FeS_2	6,1
Caolinita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	9,5
Moscovita	$KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	1,3
Cuarzo	SiO_2	14,6
Clorita	$(Mg,Fe)_3(Si,Al)_4O_{10}((OH)_2(Mg,Fe)_3(OH)_6)$	2,1
Feldespato cálcico	$CaAl_2Si_2O_6$	1,2
Feldespato sódico-cálcico	$NaAlSi_3O_8$ $CaAl_2Si_2O_6$	1,3
Siderita	$FeCO_3$	Trazas
Smithsonita	$ZnCO_3$	Trazas
Yeso	$CaSO_4 \cdot 7H_2O$	Trazas

5.3.3. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS LODOS VERTIDOS AL MAR

Durante los años 1960 a 1979 (SMMPE, 1980), se trataron en el lavadero Roberto 3,08 Mt de todo-uno, con unas leyes medias de 1,33% Pb y 1,44% Zn. Los residuos resultantes fueron 2,93 Mt de lodo, vertidos al mar, cuyas leyes medias fueron 0,26% Pb y 0,63% Zn.

En la Tabla 5.12, se relacionan los principales componentes químicos de los lodos vertidos en el mar en forma de óxidos y elementos, en muestras de las Bahías de Gorguel y Portman, y se comparan con los resultados obtenidos por Solano, (1990). Los elementos mayoritarios son el Fe, Si, Al y S, en menor medida aparece el Ca, Mg y K. Entre ellos se encuentran elementos tóxicos, tales como son el Pb, Zn, Cu, As, los cuales se han detectado en las aguas y los sedimentos continentales y marinos (ver Capítulos 6 y 7).

Comparando los valores obtenidos para el Pb y Zn según la empresa SMMPE con los de la Tabla 5.12, se ve que estos últimos son más elevados. Esto se puede explicar, bien porque las muestras son puntuales y es posible encontrar esos valores, o porque los lodos de la playa están lavados y es en las partículas más gruesas donde se concentra el mineral. Además la movilidad geoquímica de estos metales en las condiciones de pH alcalino es prácticamente nula.

Tabla 5.12. Composición química de muestras de lodos de flotación vertidos al Mar Mediterráneo.

Bahía	Portman	Gorguel	Solano, 1990	Portman	Gorguel	
Óxidos	% peso		% peso	Elementos	% peso	
P.C.	5,90	7,10	15,10	P.C.	5,90	
MgO	2,90	4,57	3,41	Mg	1,75	2,76
Al ₂ O ₃	15,70	10,10	10,40	Al	8,31	5,35
SiO ₂	36,80	31,40	26,00	Si	17,21	14,68
P ₂ O ₅	0,10	0,09		P	0,04	0,04
SO ₃	6,42	2,60		S	2,57	1,04
Cl	0,25	0,27		Cl	0,25	0,27
K ₂ O	1,65	0,80	1,11	K	1,37	0,66
CaO	3,30	6,07	5,35	Ca	2,37	4,37
TiO ₂	0,23	0,35		Ti	0,14	0,21
Cr ₂ O ₃	0,02	0,02		Cr	0,01	0,01
MnO	0,94	1,30		Mn	0,73	1,01
Fe ₂ O ₃	29,70	36,87	31,00	Fe	26,73	33,19
CuO	0,03	0,04		Cu	0,02	0,03
ZnO	1,99	2,15	1,25	Zn	1,57	1,70
As ₂ O ₃	0,07	0,01		As	0,05	0,01
Rb ₂ O	0,01	0,00		Rb	0,01	0,00
SrO	0,01	0,11		Sr	0,01	0,09
ZrO ₂	0,01	0,01		Zr	0,01	0,01
PbO	0,65	1,44	0,77	Pb	0,59	1,31
Na ₂ O	1,14	1,36	1,91	Na	0,85	1,01
S _{total}			3,46			

P.C.: pérdidas por calcinación. Portman y Gorguel: SMMPE, 1980; Solano, 1990: 6 muestras de la bahía de Portman.

5.4. ESTÉRIL DE CONCENTRACIÓN GRAVIMÉTRICA

Constituye el apilamiento de los materiales estériles resultantes del proceso de concentración de los minerales por el método gravimétrico, incluidos el cribado, balsa de arroyo y rumbo. Producidos desde tiempos prerromanos hasta el año 1950, en que se sustituye éste método por el de flotación diferencial.

Son materiales de grano medio, tamaño gravas-arenas, dispuestos en tongadas de unos 30° de inclinación (Foto 5.26), en depósitos de dimensiones reducidas.



Foto 5.26. Terrera de gravimetría. Minera Celdrán (Llano del Beal).

5.4.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS ESTÉRILES DE GRAVIMETRÍA

Los estériles procedentes del tratamiento de minerales por gravimetría, están muy distribuidos por toda la Sierra, ya que, en la mayor parte de los casos, se trataba de instalaciones muy rudimentarias que se montaban a pie de bocamina.

Algunas de sus características se citan en la Tabla 5.13.

Tabla 5.13. Extensión y volumen ocupado por las terreras de gravimetría.

Nº de terreras	119
Área ocupada	0,65 km ²
Volumen	3,73 Mm ³
Granulometría	Comprendida entre grava y limo
Distribución del número de escombreras en cuencas hidrográficas de ramblas	Carrasquilla 1; Ponce 12; Beal 19; Matildes 31; Miedo 27; Portman 6; Gorguel 7; Escombreras 12 y Hondón 4.

pH: estos materiales presentan un rango de pH muy amplios, en ellos se pueden encontrar valores desde muy ácidos ($pH < 2$) a básicos ($pH < 7,5$). En la Figura 5.7, se representan los valores de pH medidos en el laboratorio sobre varias muestras de estériles de gravimetría.

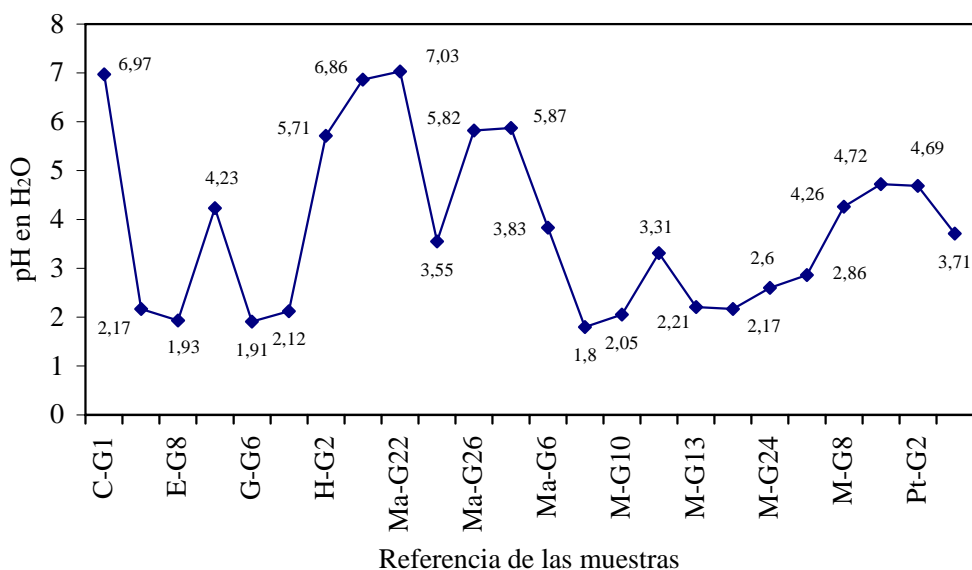
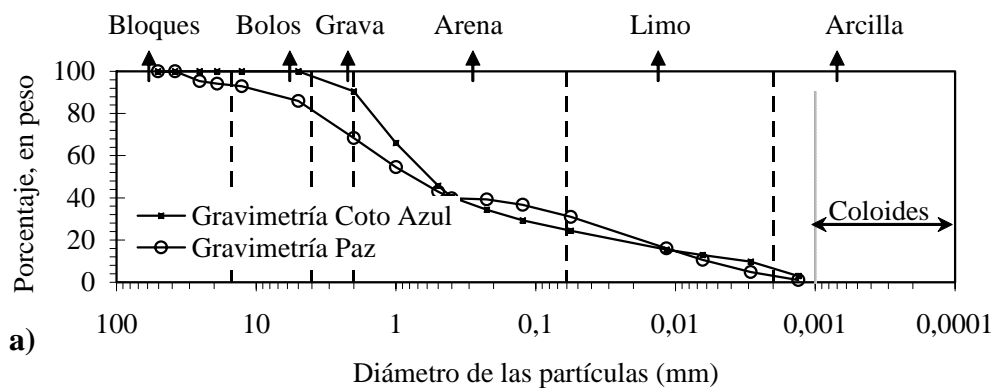


Figura 5.7. Representación de los valores de pH medidos en varias muestras de terreras de gravimetría.

Peso específico de las partículas sólidas: presentan un valor elevado, siendo la media de cuatro determinaciones (dos en Coto Azul y dos en 2ª Paz) de 3,32 g/cm³. Estos valores son muy superiores a los de un suelo normal y se debe al alto contenido en metales pesados.

Granulometría: En la Figura 5.8 se puede apreciar la diferencia en los resultados del ensayo granulométrico realizado en seco y en húmedo. Se observas en la Figura 5a que hay una fracción de arcilla que no aparece en la Figura 5.8b. El 80% de las partículas tiene un tamaño comprendido entre 4 y 0,001 mm. Al igual que los lodos de flotación, para el estudio granulométrico se consideran las curvas realizadas en los ensayos en húmedo. Según la curva granulométrica de la Figura 5.8a, se trata, en los dos casos analizados, de partículas de tamaño grava-arena-limos con algo de arcilla, al parecer en estos residuos predomina la fracción arena.



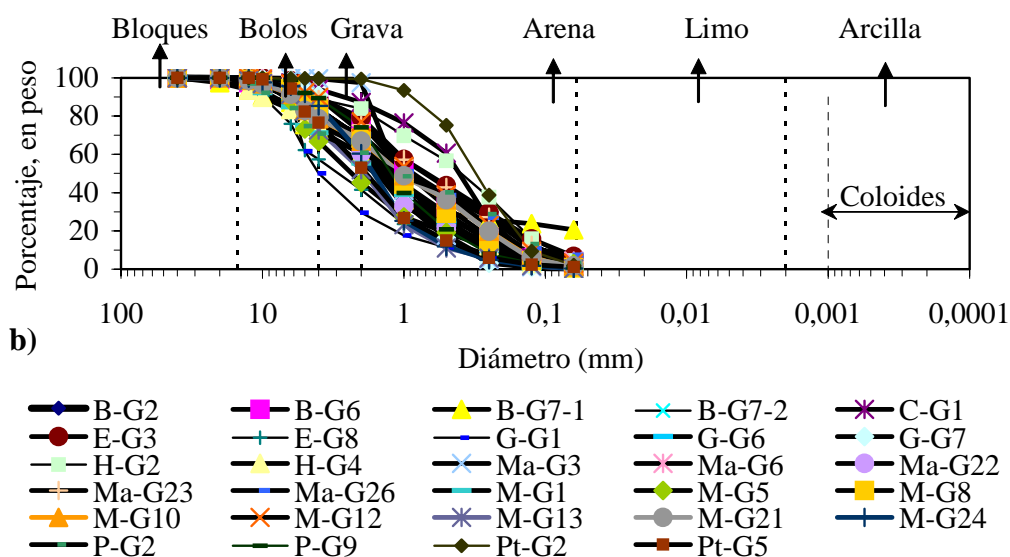


Figura 5.8. Curvas granulométricas de terreras de gravimetría: a) en húmedo, b) en seco.

5.4.2. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA

La composición mineralógica que figura en la Tabla 5.14, muestra que el mineral predominante es el hematites, seguido del cuarzo, la pirita, caolinita y clorita. En menores concentraciones aparecen otros minerales que se muestran como trazas. El hecho de que aparezca tan poco mineral de Fe comparado con el Fe total puede deberse a la presencia de Fe amorfo.

Tabla 5.14. Composición mineralógica de los estériles de gravimetría (% en peso semicuantitativo).

Minerales	Fórmula	% en peso
Hematites	Fe_2O_3	12.2
Magneta	Fe_3O_4	4.1
Galena	PbS	Trazas
Arsenopirita	FeAsS	Trazas
Esfalerita o blenda	ZnS	1.1
Calcopirita	FeCuS	1.2
Pirrotina	Fe_{1-x}S	Trazas
Pirita	FeS_2	8.2
Caolinita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	2.5
Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	Trazas
Calcita	CaCO_3	Trazas
Moscovita	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	1.1
Cuarzo	SiO_2	10.1
Clorita	$(\text{Mg,Fe})_3(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}((\text{OH})_2(\text{Mg,Fe})_3(\text{OH})_6)$	2.1
Feldespato cálcico	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_6$	Trazas
Feldespato sódico-cálcico	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_6$	2.1
Siderita	FeCO_3	Trazas
Yeso	$\text{CaSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Trazas

5.4.3. COMPOSICIÓN QUÍMICA

En la Tabla 5.15 se muestra la composición química de los estériles de gravimetría. Los elementos mayoritarios son el Fe, Si, Al, Mg y Ca. En el grupo de los metales pesados destaca el Pb (2,01%) y Zn (1,26%). Estos valores se pueden considerar normales, ya que los minerales que se separaban por gravimetría eran muy ricos y el método de separación poco preciso. Un elevado volumen de estas escombreras ha sido relavado, en lavaderos de pequeña capacidad, principalmente durante el periodo 1940 a 1985.

Tabla 5.15. Composición química de los estériles de gravimetría.

Óxidos	% peso	Elementos	% peso
P.C.	7,20		7,20
MgO	4,15	Mg	2,50
Al ₂ O ₃	5,74	Al	3,04
SiO ₂	26,40	Si	12,34
P ₂ O ₅	0,07	P	0,03
SO ₃	8,88	S	3,55
Cl	0,04	Cl	0,04
K ₂ O	0,23	K	0,19
CaO	1,56	Ca	1,12
TiO ₂	0,23	Ti	0,13
Cr ₂ O ₃	0,01	Cr	0,01
MnO	0,98	Mn	0,76
Fe ₂ O ₃	39,41	Fe	35,47
CuO	0,05	Cu	0,04
ZnO	1,60	Zn	1,26
As ₂ O ₃	0,11	As	0,08
SrO	0,00	Sr	0,00
PbO	2,21	Pb	2,01

P.C: pérdidas por calcinación.

Por otro lado, los valores obtenidos para las muestras de la Tabla 5.16 no son muy representativos de los citados estériles de gravimetría, puesto que presentan valores de Pb y Zn muy bajos, excepto el Pb de las muestras tomadas en las balsas B-G7-1 y P-G8.

Tabla 5.16. Composición química en %, de 5 muestras de gravimetría (Julio 2003).

Rambla	Muestra	Cadmio	Plomo	Cobre	Zinc	Manganeso
Beal	B-G2	0,00025	0,08	0,00	0,17	0,03
Beal	B-G6	0,00023	0,21	0,00	0,16	0,07
Beal	B-G7-1	0,00019	2,16	0,00	0,02	0,00
Beal	B-G7-2	0,00017	0,12	0,01	0,11	0,01
Ponce	P-G8	0,00011	1,32	0,01	0,08	0,01
Valor medio		0,00019	0,78	0,0	0,11	0,02

5.5. ESTÉRIL DE MINA

Son aquellos materiales estériles que se han arrancado en la mina y se han acumulado en el exterior, en la terrera del pozo. Su origen data de finales del siglo XIX (Foto 5.27).



Foto 5.27. Terrera de estéril de la mina Oportunidad. Carretera del Gorguel.

5.5.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS ESTÉRILES DE MINA

Para entender la magnitud y repercusión ambiental que tienen los estériles de mina, en la Tabla 5.17 se resumen algunos datos significativos, tales como su distribución espacial por cuencas hidrográficas, el área que ocupan (0,48 km²) y el volumen almacenado (3,01 Mm³).

Tabla 5.17. Extensión y volumen ocupado por las escombreras de estéril de mina.

Nº de escombreras	176
Área ocupada (km ²)	0,48
Volumen (Mm ³)	3,01
Granulometría	Comprendida entre bloques y arena.
Distribución del número de escombreras de estéril de mina en cuencas hidrográficas de ramblas	Carrasquilla 7; Ponce 15; Beal 21; Matildes 34; Miedo 41; Portman 19; Gorguel 14; Escombreras 16 y Hondón 9.

pH: el valor medido sobre tres muestras en laboratorio tiene un rango comprendido entre 6,1 y 7,5.

Peso específico de las partículas sólidas: son materiales muy similares a los acumulados en los vacíos de corta. El peso específico de las partículas sólidas medido en el laboratorio sobre dos muestras es de 2,8 g/cm³.

Granulometría: de los ensayos granulométricos realizados en muestras de estériles de mina, se han obtenido los siguientes resultados (Figura 5.9). El 80% de las partículas tiene un tamaño comprendido entre 0,04 y 5 mm. Según la granulometría obtenida, se trata, en todos de los casos, de partículas de tamaño bolos-grava-arena con algo de limo.

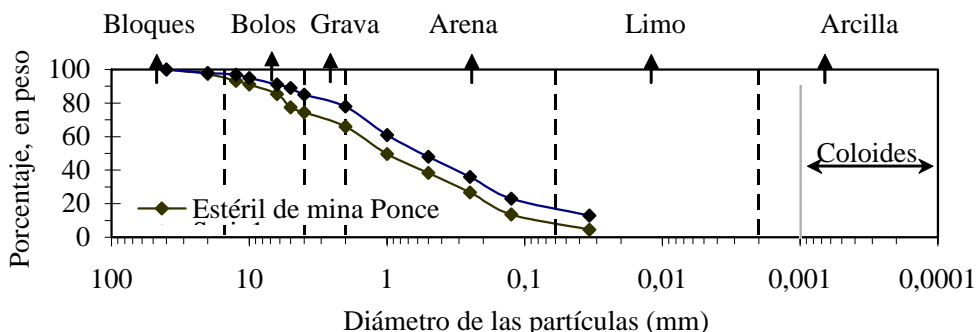


Figura 5.9. Curvas granulométricas de los estériles de mina de la muestra P-E8.

5.5.2. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA

En la Tabla 5.18, se aprecia un predominio del cuarzo seguido de la caolinita, hematites y pirita, en menor medida aparecen galena y moscovita.

Tabla 5.18. Composición mineralógica de los estériles de mina (% en peso semicuantitativo).

Minerales	Fórmula	(% en peso)
Hematites	Fe ₂ O ₃	5.2
Magnetita	Fe ₃ O ₄	2.2
Galena	PbS	1.2
Esfalerita o blenda	ZnS	Trazas
Calcopirita	FeCuS	Trazas
Pirrotina	Fe _{1-x} S	Trazas
Pirita	FeS ₂	5.2
Caolinita	Al ₂ SiO ₂ O ₅ (OH) ₄	8.7
Dolomita	CaMg (CO ₃) ₂	Trazas
Calcita	CaCO ₃	Trazas
Moscovita	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂	1.0
Cuarzo	SiO ₂	21.1
Clorita	(Mg,Fe) ₃ (Si,Al) ₄ O ₁₀ ((OH) ₂ (Mg,Fe) ₃ (OH) ₆	3.2
Feldespató cálcico	CaAl ₂ Si ₂ O ₆	Trazas
Feldespató sódico-cálcico	NaAlSi ₃ O ₈ CaAl ₂ Si ₂ O ₆	Trazas
Siderita	FeCO ₃	Trazas

5.5.3. COMPOSICIÓN QUÍMICA

De los valores obtenidos en una muestra puntual, el elemento predominante en la composición de los estériles de mina es el Si seguido del Fe (Tabla 5.19), en orden decreciente le siguen el Al, Mg, S y Ca. Se puede apreciar que en el caso de los metales el Zn tiene una concentración superior al 1,9% y el Pb de 0,8%.

Tabla 5.19. Composición química de las escombreras de estériles de mina. Muestra P-E8.

Óxidos	% peso	Elementos	% peso
L.O.I.	7,10		7,10
MgO	6,10	Mg	3,68
Al ₂ O ₃	10,20	Al	5,40
SiO ₂	48,10	Si	22,49
P ₂ O ₅	0,10	P	0,04
SO ₃	5,30	S	2,12
		Cl	0,01
K ₂ O	1,25	K	1,04
CaO	1,87	Ca	1,35
TiO ₂	0,62	Ti	0,37
Cr ₂ O ₃	0,05	Cr	0,03
MnO	0,05	Mn	0,04
Fe ₂ O ₃	22,30	Fe	20,07
CuO	0,02	Cu	0,02
ZnO	2,50	Zn	1,97
As ₂ O ₃	0,04	As	0,03
Rb ₂ O	0,01	Rb	0,00
SrO	0,02	Sr	0,01
ZrO ₂	0,02	Zr	0,01
PbO	0,91	Pb	0,83
Na ₂ O	0,21	Na	0,28
BaO	0,05	Ba	0,05

5.6. ÓXIDOS

Los minerales oxidados de la cobertera de los yacimientos de sulfuros reciben el nombre de gossan (Foto 5.28). Se trata de minerales que por encontrarse prácticamente en estado de óxidos, no pueden concentrarse por los procedimientos industriales conocidos, y se han acumulado en vacíos específicos (Foto 5.29) hasta tanto no se resuelve el problema de su tratamiento (Manteca et al., 2004). Estos residuos se depositaron entre 1953 y 1991.



Foto 5.28. Montera de Óxidos (gossan) de la corta San Valentín.



Foto 5.29. Escombrera de Óxidos (gossan) Erizo. Situada a la entrada de la corta Emilia.

5.6.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS ÓXIDOS

Para entender la magnitud y repercusión ambiental, que tienen los óxidos, en la Tabla 5.20 se resumen algunos datos significativos, tales como su distribución espacial por cuencas hidrográficas, el área que ocupan (0,26 km²) y el volumen almacenado (6,93 Mm³).

Tabla 5.20. Extensión y volumen ocupado por las escombreras de óxidos.

Nº de escombreras	11
Área ocupada (km ²)	0,26
Volumen (Mm ³)	6,93
Granulometría	Comprendida entre grava y limos.
Distribución del número de escombreras en cuencas hidrográficas de ramblas	Matildes 6; Miedo 1 y Portman 4.

pH: el valor de pH medido sobre 6 muestras en el laboratorio es siempre superior a 6,5, con un rango de 6,5-8. Este valor tan elevado se debe a que están compuestos en gran medida por minerales muy oxidados que son muy estables en el medio natural.

Peso específico de las partículas sólidas: los ensayos realizados en cuatro muestras de óxidos, dos en el vacie de Erizo con resultado de 3,33 y dos en el de Esmeralda con 3,32, por lo que el valor medio es de 3,325.

Granulometría: de los dos ensayos granulométricos realizados en muestras de óxidos, se han obtenido los siguientes resultados (Figura 5.10). El 80% de las partículas tiene un tamaño comprendido entre 4 y 0,001 mm. Según la granulometría obtenida, se trata, en todos de los casos, de partículas de tamaño grava-arena-limos con algo de arcillas.

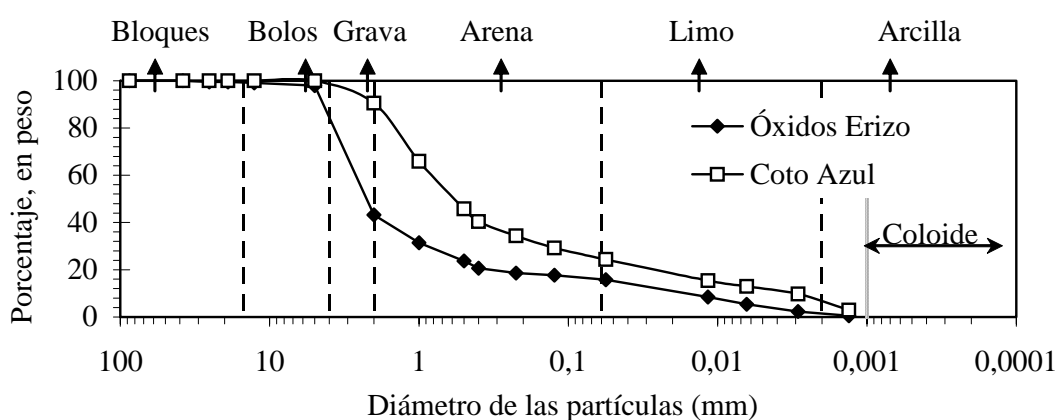


Figura 5.10. Curvas granulométricas de 2 muestras de óxidos.

5.6.2. COMPOSICIÓN PETROLÓGICA

Las diferentes escombreras de óxidos presentan entre sí importantes diferencias de constitución litológica, en función del yacimiento de procedencia y del grado y tipo de contaminación con rocas estériles que han sufrido durante la apertura de las cortas.

A su vez, dentro de cada escombrera, entre las distintas muestras estudiadas aparecen importantes diferencias en relación a la cuantía y naturaleza petrológica de las gangas (polución) que acompañan al mineral oxidado, como se aprecia en la Tabla 5.21.

Tabla 5.21. Composición petrológica en tanto por ciento en peso.

Escombrera	Número de muestras	Óxidos	Cuarzo, cuarcitas ópalo	Rocas Verdes y esquistos cloríticos	Micas-esquistos	Filitas	Rocas arcillosas	Calizas	Grenalita con sulfuros	Sulfuros
Primera (1)	4	54.00	10.00	1.37	0.25	6.25	28.88	0.12	-	-
Anticipada (2)	2	62.00	14.00	8.50	6.50	3.50	-	2.50	-	-
Cuarta (3)	6	56.34	9.17	5.00	6.33	12.83	2.33	6.83	1.17	-
Esmeralda (4)	7	64.86	11.57	1.57	5.86	6.14	-	10.00	-	-
Erizo (5)	4	60.25	3.50	13.00	1.38	8.87	3.50	9.25	-	0.25
Casualidad (6)	6	56.94	12.83	5.83	8.00	6.83	2.65	6.92	-	-
Miseria (7)	2	63.50	14.5	10.00	6.50	3.50	-	2.00	-	-

El porcentaje de dilución o grado de contaminación del mineral oxidado con rocas estériles, medido en las muestras estudiadas, varía entre el 46 y el 35% del peso total de las muestras analizadas. En la Tabla 5.21 se representa la proporción de cada uno de estos tipos litológicos.

A pesar del citado grado de heterogeneidad a nivel de muestras de pozos y de escombreras (o grupo de escombreras), se aprecian unas características peculiares y definitorias, en relación principalmente con su procedencia original (Tabla 5.21).

El carácter diferencial más acusado se encuentra en la escombrera de Primera (1), que se caracteriza por tener una ganga formada, predominantemente, por rocas arcillosas (conocidas localmente como “blanquetes”), que proceden de la caolinización de las doleritas. Estos “blanquetes” suponen en media, sobre las muestras estudiadas de Primera (1), el 28,88% del peso total (Tabla 5.21).

En los óxidos de Esmeralda (4), Erizo (5) y Casualidad (6), procedentes del gossan del yacimiento de corta Emilia, es de destacar como característica la abundancia de rocas carbonatadas, fundamentalmente calizas, formando la ganga. En la constitución de dicha ganga tienen también bastante importancia las filitas y las rocas verdes (doleritas).

La escombrera Miseria (7), procedente del gossan de la zona de la corta Tomasa, presenta como característica diferencial el predominio, dentro de la ganga, de las rocas verdes (metabasitas y cloritoesquistos).

En la Tabla 5.21 se presenta el análisis comparativo entre las diferentes escombreras estudiadas, y en el diagrama triangular (Figura 5.11) se aprecia la existencia de tres grupos en función del depósito original del que se ha extraído.

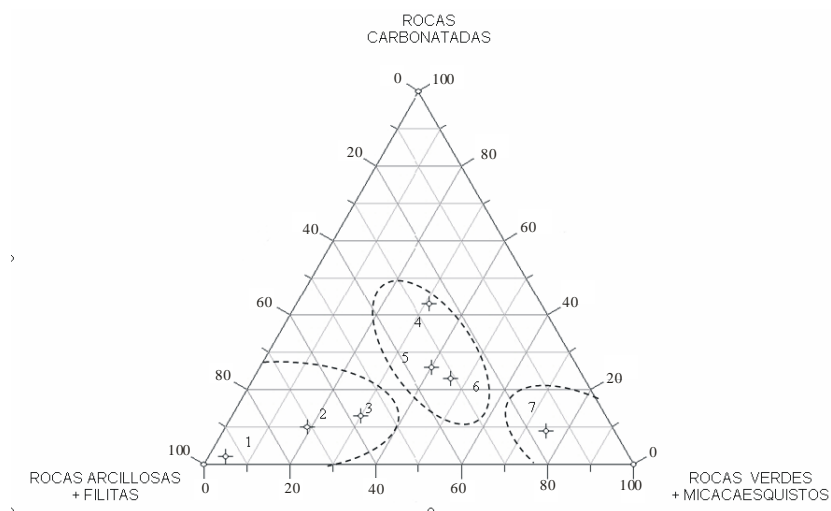


Figura 5.11. Diagrama triangular. Procedencia de corta San Valentín: Primera (1); Anticipada (2) y Cuarta (3). Procedencia de corta Emilia: Esmeralda (4); Erizo (5) y Casualidad (6). Procedencia de corta Tomasa: Miseria (7).

5.6.3. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA

En la mineralogía de las escombreras de óxidos se comprueba el predominio del cuarzo, seguido de los minerales de óxidos de Fe y la pirita y en menor medida la caolinita. El resto de los minerales se encuentran en concentraciones inferiores al 2% (Tabla 5.22).

Tabla 5.22. Composición mineralógica de los óxidos (% en peso semicuantitativo).

Minerales	Fórmula	(% en peso)
Hematites	Fe_2O_3	12.4
Magnetita	Fe_3O_4	2.2
Galena	PbS	1.2
Arsenopirita	FeAsS	Trazas
Esfalerita o blenda	ZnS	1.1
Calcopirita	FeCuS	6.3
Pirrotina	Fe_{1-x}S	Trazas
Pirita	FeS_2	5.6
Caolinita	$\text{Al}_2\text{SiO}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	1.5
Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	Trazas
Calcita	CaCO_3	Trazas
Moscovita	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	1.1
Cuarzo	SiO_2	20.8
Clorita	$(\text{Mg,Fe})_3(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2(\text{Mg,Fe})_3(\text{OH})_6$	2.2
Feldespato cálcico	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_6$	Trazas
Siderita	FeCO_3	Trazas

5.6.4. COMPOSICIÓN QUÍMICA

En la composición química de los óxidos el elemento mayoritario es el Fe como cabría esperar (Tabla 5.23). En segundo lugar se encuentra el Si, y en concentraciones similares el Mg y Al. En cuanto a los metales destaca la concentración de Pb que es casi tres veces mayor que el Zn. Esta diferencia se debe a que el Zn es lavado por las aguas meteóricas, mientras que el Pb se concentra en el producto residual de oxidación, pues el pH del agua de lluvia es generalmente superior a 5,5 y en estas condiciones la movilidad del Pb es nula.

En la Tabla 5.23 se ha incluido una columna con el valor medio obtenido en la Tabla 5.24, cuyo muestreo se realizó tomando 1000 kg de muestra en cada una de las escombreras de óxidos, por lo que los resultados son muy representativos. Se puede ver que los valores obtenidos en ambos muestreos es muy similar.

Tabla 5.23. Composición química de las escombreras de óxidos. Valor medio de 4 muestras: 2 en “Erizo” y 2 en “Esmeralda”.

Óxidos	% peso		Elementos	% peso
	VM Erizo+Esmeralda	VM Tabla 5.24		
P.c.	10,02			
MgO	3,45		Mg	3,00
Al ₂ O ₃	6,27	5,50	Al	3,78
SiO ₂	32,70	30,73	Si	17,31
P ₂ O ₅	0,08		P	0,04
SO ₃	1,22		S	0,53
			Cl	0,01
K ₂ O	0,11		K	0,11
CaO	0,78	2,14	Ca	0,65
TiO ₂	0,31		Ti	0,22
Cr ₂ O ₃	0,01		Cr	0,01
MnO	1,30		Mn	0,89
Fe ₂ O ₃	39,75	37,77	Fe	30,79
CuO	0,04	0,01	Cu	0,04
ZnO	0,91	1,05	Zn	0,72
As ₂ O ₃	0,11	0,01	As	0,09
Rb ₂ O	0,00		Rb	0,00
SrO	0,01		Sr	0,01
PbO	2,81	1,84	Pb	2,08

VM: Valor medio; P.c.: Pérdida por calcinación.

Tabla 5.24. Composición química en elementos y óxidos mayoritarios. Composición química expresada en por ciento en peso. Para la plata (g/t). Manteca et al., 2004 a.

Escombreras									
	Primera	Anticipada	Cuarta	Esmeralda	Erizo	Casualidad	Miseria	Corta S.V	
Nº muestras	4	2	6	7	4	6	2	1	Media
Pb	1,96	2,10	1,93	1,52	1,45	2,6	2,60	0,55	1,84
Zn	0,40	0,53	0,82	0,79	0,74	1,24	0,87	2,99	1,05
Cu	-	-	0,03	-	-	0,02	0,02		0,01
As	-	-	<0,02	<0,02	-	0,04	<0,01		0,01
Sb	-	-	<0,05	<0,01	-	<0,1	0,05		0,01
Ag*	31,2	21,5	29,5	19,1	19,8	25,8	29,5		25,2
SiO ₂	40,8	36,0	29,4	29,8	29,2	28,1	28,5	24,0	30,73
Fe ₂ O ₃	29,5	34,1	40,0	42,0	38,5	39,3	41,0		37,77
Al ₂ O ₃	8,5	8,4	7,1	5,8	3,9	5,2	4,0	1,1	5,5
OCa	0,8	2,4	2,2	2,7	3,6	3,2	1,1	1,11	2,14
OMg	1,3	1,0	1,9	2,4	2,4	2,7	1,5	1,06	1,78
Fe total								46,86	46,86
Mn								0,65	0,65
S								0,41	0,41
K ₂ O								0,30	0,30
Na ₂ O								0,26	0,26

S.V: San Valentín.

5.7. RECHAZO DE GRANULOMETRÍA

Estos depósitos son los estériles que proceden de un proceso de preconcentración, el cual se realizaba dentro del ciclo de flotación diferencial. Dado que los sulfuros se concentraban preferentemente en la fracción fina, se realizaba un corte granulométrico del todo-uno mediante cribas, y se eliminaba la fracción superior a 30 mm, con lo que se obtenía un importante ahorro en los costes económicos en el proceso del lavadero. Este tipo de escombreras se encuentran en la zona del Llano del Beal (Coto Ponce) (Fotos 5.30 y 5.31).

**Foto 5.30.** Escombrera de Rechazo de Granulometría. Coto Ponce.**Foto 5.31.** Detalle de la foto anterior.

5.7.1. CARACTERÍSTICAS DEL RECHAZO DE GRANULOMETRÍA

Para entender la magnitud y repercusión ambiental, que tienen los materiales procedentes del rechazo de granulometría, en la Tabla 5.25 se resumen algunos datos significativos. Se encuentran únicamente en la cuenca de la rambla de Ponce. En comparación con los residuos estudiados, estos son los que ocupa menor superficie ($0,06 \text{ km}^2$) y volumen almacenado ($0,59 \text{ Mm}^3$).

Tabla 5.25. Extensión y volumen ocupado por los montones de rechazo de granulometría.

Nº de montones	1
Área total ocupada	$0,06 \text{ km}^2$
Volumen	$0,59 \text{ Mm}^3$
Granulometría	Comprendida entre bloques y arenas
Distribución del número de escombreras en cuencas hidrográficas de ramblas	Ponce 1.

pH: el valor medio, de las dos determinaciones realizadas en muestras tomadas en Coto Ponce, es de 6,4 unidades.

Peso específico de las partículas sólidas: los ensayos realizados en 2 muestras de rechazo de granulometría, en los montones ubicados en Coto Ponce (llano del Beal), han dado un valor medio es de $2,83 \text{ g/cm}^3$.

Granulometría: presenta una granulometría variable (Figura 5.12). El tamaño de las partículas varía entre 30 y 0,1 mm. De acuerdo con el tamaño de las partículas se puede clasificar como un residuo compuesto por bloques, bolos, gravas y arenas.

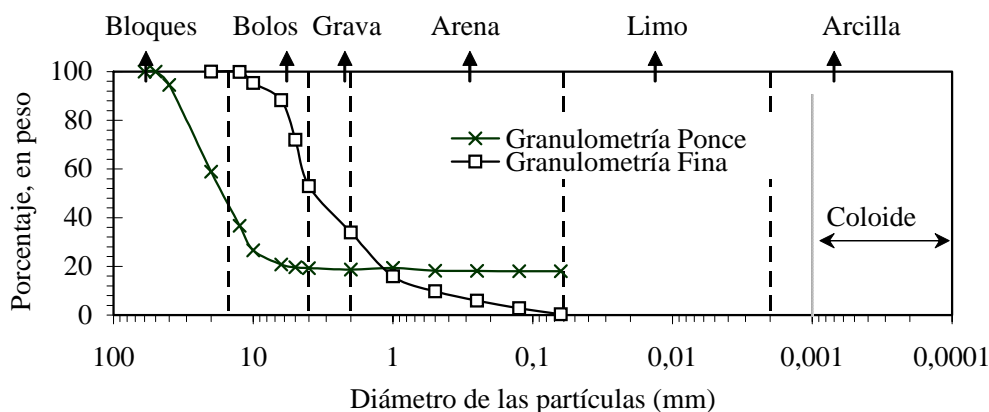


Figura 5.12. Curvas granulométricas de dos muestras de rechazo de granulometría: P-RG1 y P-RG1 (fino).

5.7.2. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA

En los materiales de granulometría se puede apreciar que los minerales predominantes son el hematites, cuarzo, pirita, caolinita y magnetita. En menor medida pirrotina, galena, dolomita. Además hay trazas de otros minerales.

Tabla 5.26. Composición mineralógica del rechazo de granulometría (% en peso)

Minerales	Fórmula	(% en peso)
Hematites	Fe_2O_3	17,6
Magnetita	Fe_3O_4	4,1
Galena	PbS	1,1
Arsenopirita	FeAsS	Trazas
Esfalerita o blenda	ZnS	Trazas
Calcopirita	FeCuS	Trazas
Pirrotina	Fe_{1-x}S	1,2
Pirita	FeS_2	10,1
Caolinita	$\text{Al}_2\text{SiO}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	9,5
Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	2,3
Calcita	CaCO_3	Trazas
Moscovita	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	Trazas
Cuarzo	SiO_2	10,1
Clorita	$(\text{Mg,Fe})_3(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}((\text{OH})_2(\text{Mg,Fe})_3(\text{OH})_6)$	Trazas
Feldespató cálcico	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_6$	Trazas
Feldespató sódico-cálcico	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_6$	Trazas
Siderita	FeCO_3	Trazas

5.7.3. COMPOSICIÓN QUÍMICA

En la Tabla 5.27 se indica el valor medio de la composición química para dos muestras de rechazo de granulometría. Se observa que el elemento mayoritarios es el Fe y en segundo lugar el Si. También se aprecia una mayor concentración de Pb que de Zn. Esta diferencia responde a las características geoquímicas de estos elementos, pues el Zn es más soluble en agua que el Pb, para las condiciones de pH que presentan estos residuos al ponerse en contacto con el agua.

Comparando estos resultados con los obtenidos en una muestra (julio 2003) se observa una coherencia entre ellos, sobre todo en el Pb y Zn.

Tabla 5.27. Composición química del rechazo de granulometría.

Óxidos	Resultado de 2 muestras		Muestra julio 2003
	% en peso	Elementos	% en peso
L.O.I.	4,20	L.O.I.	4,20
MgO	1,74	Mg	1,05
Al ₂ O ₃	2,53	Al	1,34
SiO ₂	26,50	Si	12,39
P ₂ O ₅	0,05	P	0,02
SO ₃	5,98	S	2,39
		Cl	0,02
K ₂ O	0,04	K	0,03
CaO	0,71	Ca	0,51
TiO ₂	0,28	Ti	0,16
Cr ₂ O ₃	0,01	Cr	0,01
MnO	0,22	Mn	0,17
			0,06
Fe ₂ O ₃	54,83	Fe	49,35
CuO	0,03	Cu	0,03
			0,011
ZnO	0,54	Zn	0,42
			0,26
As ₂ O ₃	0,24	As	0,18
PbO	1,28	Pb	1,17
		Cd	1,35
			0,0003

5.8. ESCORIA DE FUNDICIÓN

Son los depósitos de las gachas procedentes de los hornos de fundición (Foto 5.32 y 5.33), las cuales se acopian en escombreras denominadas localmente “gacheros”. Estos materiales son de naturaleza silicatada, textura vítrea, granulometría gruesa.

5.8.1. CARACTERÍSTICAS DE LAS ESCORIAS DE FUNDICIÓN

Se han inventariado 19 acumulaciones de escorias de fundición, con un volumen aproximado de 657.497 m³, que ocupan un área de 0,13 km². El volumen de dichos depósitos debió de ser mucho mayor, según mis estimaciones pudieron ser 6 millones de m³, pues entre 1840 (fecha en que comienzan a establecerse las fábricas de fundición) y 1854 años existían en la Sierra Minera 70 fundiciones de mineral de plomo (Vilar y Egea, 1985). Durante los últimos 25 años se ha estado utilizando la gacha como árido para construcción de carreteras dentro de la comarca del Campo de Cartagena.



Foto 5.32. Escorias de fundición. Cuevas de Roma (El Descargador-La Unión).

Foto 5.33. Detalle de la foto anterior.

Tabla 5.28. Extensión y volumen ocupado por las acumulaciones de escorias de fundición.

Nº de gacheros	19
Área total ocupada	0,13 km ²
Volumen	0,66 Mm ³
Granulometría	Comprendida entre bloques y bolos
Distribución del número de acumulaciones en cuencas hidrográficas de ramblas	Ponce 2; Beal 1; Matildes 6; Miedo 9 y Portman 1.

pH: se realizó la medida a tres muestras en el laboratorio. Para ello se colocaron en contacto con el agua Milli-Q que tiene un pH de 5,6. Los valores del efluente resultantes fueron muy similares a los del agua, entre 5,1 y 6,5.

Peso específico: las escorias de fundición se caracterizan por presentar una densidad de las partículas elevadas. El valor medio de dos ensayos es 3,79 g/cm³. Representan dentro de todos los residuos los de mayor densidad.

Granulometría: se caracterizan por presentar una granulometría muy gruesa con predominio de la fracción bloques y en menor medida bolos (Figura 5.13).

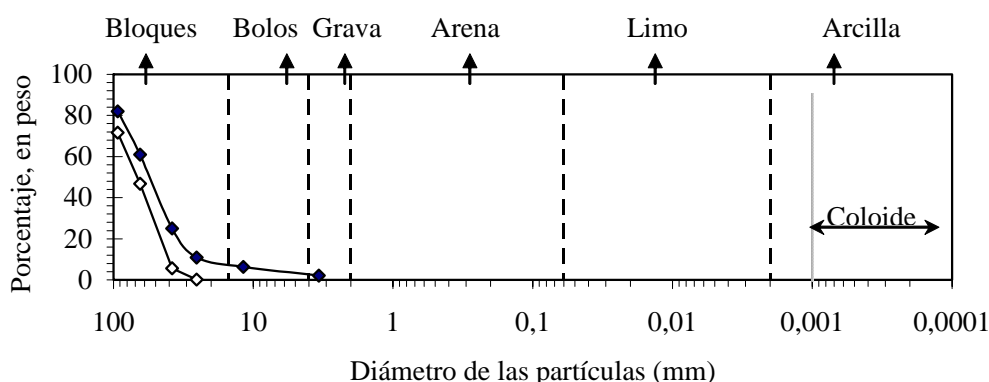


Figura 5.13. Curvas granulométricas de 2 muestras de escoria de fundición.

5.8.2. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA

En las escorias de fundición de aspecto vítreo, los principales componentes son el cuarzo, las micas y feldespato sódico. En la Tabla 5.29 se puede apreciar la composición en valores semicuantitativos de estos minerales.

Tabla 5.29. Composición mineralógica de las gachas de fundición (% en peso semicuantitativo).

Minerales	Fórmula	(% en peso)
Moscovita	$KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	1.1
Cuarzo	SiO_2	13.8
Feldespato sódico-cálcico	$NaAlSi_3O_8$ $CaAl_2Si_2O_6$	1.2

5.8.3. COMPOSICIÓN QUÍMICA

Las escorias de fundición se caracterizan por presentar concentraciones altas de varios elementos, con valores superiores al uno por ciento (Tabla 5.30), dentro de ellos destacan el Fe, Si, Pb y Zn. Estos resultados son coherentes con los resultados de Arana y Pérez (1981), que hacen un estudio de unas escorias del distrito minero de Mazarrón, diferenciando 3 tipos de escorias con una composición mineralógica y química similar a las de la Sierra de Cartagena-La Unión.

Tabla 5.30. Composición química de las gachas de fundición (% en peso).

Óxidos	% peso	Elementos	% peso
L.O.I.	0,60		0,60
MgO	1,28	Mg	0,77
Al ₂ O ₃	5,63	Al	2,98
SiO ₂	29,40	Si	13,75
P ₂ O ₅	0,08	P	0,03
SO ₃	5,94	S	2,38
Cl	0,03	Cl	0,03
K ₂ O	0,46	K	0,38
CaO	1,66	Ca	1,19
TiO ₂	0,31	Ti	0,19
Cr ₂ O ₃	0,01	Cr	0,01
MnO	0,94	Mn	0,73
Fe ₂ O ₃	48,45	Fe	43,61
CuO	0,06	Cu	0,05
ZnO	2,02	Zn	1,59
SrO	0,02	Sr	0,02
ZrO ₂	0,01	Zr	0,00
PbO	2,96	Pb	2,70
BaO	0,60	Ba	0,52

5.9. ESTÉRIL DE POZO

Son los materiales estériles procedentes de la profundización de los pozos mineros de la Sierra, acumulados en superficie alrededor de la boca de estos, y que constituyen sus escombreras (Foto 5.34).



Foto 5.34. Escombrera de pozo minero.

5.9.1. CARACTERÍSTICAS DEL ESTÉRIL DE POZO

A pesar de que existen un gran número de pozos mineros (1902), ocupan una pequeña extensión (0,02 km²) y tienen un escaso volumen (0,51 Mm³) (Tabla 5.31).

Tabla 5.31. Extensión y volumen ocupado por las escombreras de los pozos mineros.

Nº de escombreras	1902
Área total ocupada	0,02 km ²
Volumen	0,51 Mm ³
Granulometría	Comprendida entre bloques y arena
Distribución del número de escombreras de pozos mineros en cuencas hidrográficas de ramblas.	La Carrasquilla :163 ; Ponce: 246 ; Beal: 286 ; Matildes: 325 ; Miedo: 204; Portman: 301; Gorguel: 116; Escombreras: 105; Hondón: 37; Sta Lucía: 66 y Otras: 53

pH: el valor de los estériles de pozo medido en el laboratorio es de 6,1, aunque éste depende de la roca que conforme el material del estéril.

Peso específico de las partículas sólidas: los estériles de pozo presentan un peso específico variable que depende de la roca que haya cortado. El valor medio de dos ensayos es 2,9 g/cm³.

Granulometría: se caracterizan por presentar una granulometría muy gruesa con predominio de la fracción bloques y en menor medida bolos y arenas (Figura 5.14).

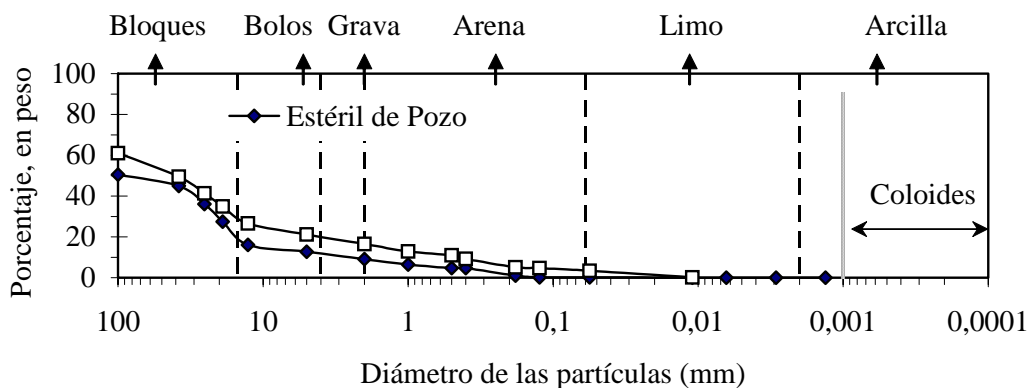


Figura 5.14. Curvas granulométricas de dos muestras de estéril del pozo C-1086.

5.9.2. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA

Tabla 5.32. Composición mineralógica de los estériles de pozo (% en peso semicuantitativo).

Minerales	Fórmula	(% en peso)
Hematites	Fe_2O_3	7.6
Magnetita	Fe_3O_4	2.1
Galena	PbS	Trazas
Esfalerita o blenda	ZnS	1.1
Calcopirita	FeCuS	2.5
Pirita	FeS_2	7.1
Caolinita	$\text{Al}_2\text{SiO}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	7.1
Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	Trazas
Calcita	CaCO_3	1.0
Moscovita	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	1.2
Cuarzo	SiO_2	17.2
Clorita	$(\text{Mg,Fe})_3(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}((\text{OH})_2(\text{Mg,Fe})_3(\text{OH})_6)$	2.1
Feldespato cálcico	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_6$	Trazas
Feldespato sódico-cálcico	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_6$	Trazas
Siderita	FeCO_3	Trazas

5.9.3. COMPOSICIÓN QUÍMICA

Tabla 5.33. Composición química de los estériles de pozos mineros (% en peso).

Óxidos	% peso	Elementos	% peso
P.c.	5,18		5,18
MgO	5,90	Mg	3,56
Al ₂ O ₃	18,60	Al	9,85
SiO ₂	42,90	Si	20,06
P ₂ O ₅	0,20	P	0,09
SO ₃	5,48	S	2,19
Cl	0,08	Cl	0,08
K ₂ O	1,90	K	1,58
CaO	1,69	Ca	1,22
TiO ₂	0,41	Ti	0,25
Cr ₂ O ₃	0,02	Cr	0,01
MnO	0,81	Mn	0,63
Fe ₂ O ₃	21,85	Fe	19,67
CuO	0,03	Cu	0,02
ZnO	2,71	Zn	2,14
As ₂ O ₃	0,02	As	0,01
Rb ₂ O	0,01	Rb	0,00
SrO	0,02	Sr	0,01
ZrO ₂	0,01	Zr	0,01
PbO	0,51	Pb	0,47
Na ₂ O	0,16	Na	0,22
BaO	0,05	Ba	0,05

P.c.: Pérdidas por calcinación.

5.10. DISCUSIÓN

De los nueve tipos de residuos cartografiados, inventariados y diferenciados en la Sierra Minera hay que tener en cuenta los siguientes aspectos que se detallan a continuación:

a) En la Figura 5.15 se ha representado el volumen almacenado por cada tipo de residuo, así como la extensión que ocupan. Se observa que estos dos parámetros no son proporcionales. El mayor volumen lo ocupan los vacies de estériles procedentes de las cortas mineras. Después le sigue las balsas de flotación, escombreras de óxidos, etc.

En la Figura 5.16, se ha representado la relación entre el volumen que almacenan y la extensión que ocupan estos residuos (ver Capítulo 4, Tabla 4.6). En dicha figura se aprecia que el menor ratio lo tienen las escorias de fundición y el mayor los estériles de los vacies

b) Tanto los materiales estériles procedentes de la explotación de las cortas mineras, como los que se originan en la apertura de los pozos mineros, y aquellos que se

extraen de las minas, son los mismos desde el punto de vista de su composición petrológica. La diferencia fundamental entre ellos es que, en los primeros, el volumen almacenado es muy grande, así como el tamaño granulométrico es mucho mayor; en tanto que en los dos últimos el volumen almacenado es muy pequeño, oscilando entre 20 y 3500 m³, y tienen una granulometría de menor tamaño (Figura 5.15).

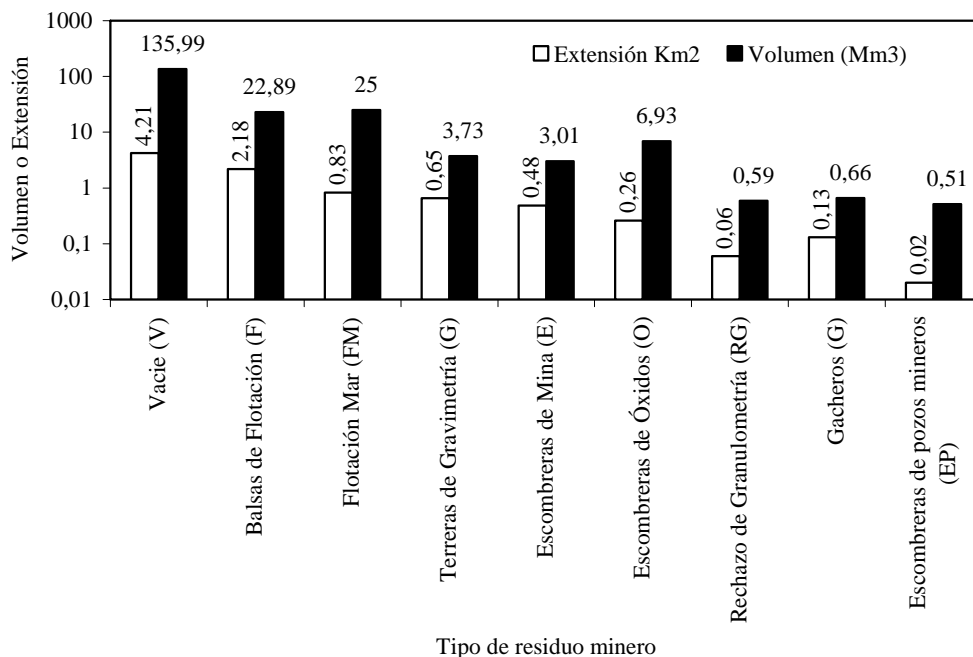


Figura 5.15. Volumen almacenado y extensión que ocupan los residuos mineros de la Sierra de Cartagena-La Unión.

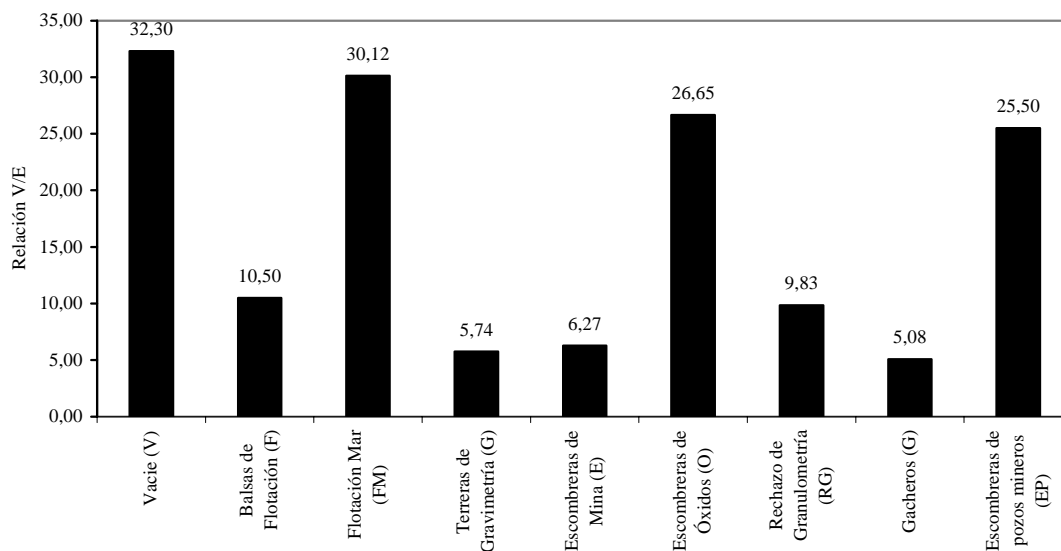


Figura 5.16. Relación entre el volumen y la extensión de los residuos mineros de la Sierra de Cartagena-La Unión.

c) Los lodos de flotación se han vertido: - en tierra (balsas) y - en el mar. Se diferencian en el medio y el modo de acumulación, no en su composición química. Los primeros se han acumulado en balsas, excepto un depósito ubicado dentro de la corta Tomasa. Los últimos han sufrido un proceso de selección por el oleaje marino que los ha clasificado desde el punto de vista granulométrico.

d) A veces se encuentran apilados dos tipos de residuos, siendo el que se encuentra arriba el que aparece en la cartografía realizada, permaneciendo oculto y sin valorar el que se encuentra tapado (Foto 5.35). Esto es un aspecto a tener en cuenta pues el comportamiento geoquímico y las propiedades hidrogeológicas de cada residuo son diferentes.



Foto 5.35. Se pueden observar dos tipos de residuos. En la parte inferior gacheros de fundición y en la superior lodos de flotación.

e) La granulometría de los diferentes tipos de residuos es muy variada, observándose todos los tipos granulométricos posibles (Figura 5.17). Desde el punto de vista ambiental los que representan un mayor riesgo por erosión son los lodos de flotación por su fina granulometría. Además estos son fácilmente erosionables por el viento. En la Figura 5.17 se puede ver como estos residuos presentan una parte importante de la granulometría inferior a 10 micras, que son las partículas que representan un riesgo ambiental para las personas y los seres vivos, pues no son retenidos por los órganos tracto respiratorios. Al ser inhalado pueden dar lugar al desarrollo de problemas respiratorios e incluso cáncer de pulmón (Merian, 1991).

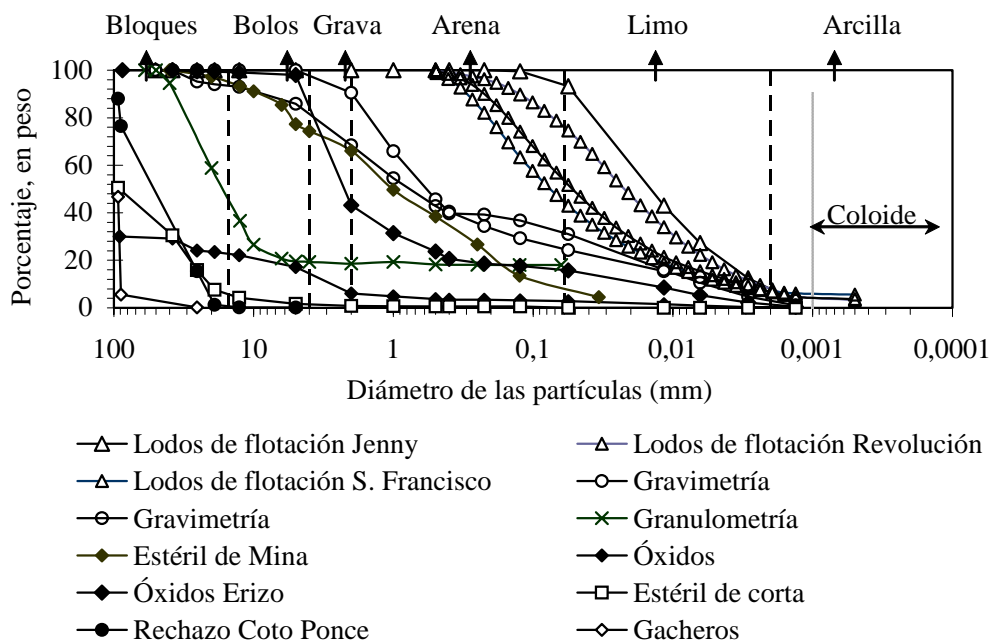


Figura 5.17. Curvas granulométricas resumen donde se muestran los distintos tipos de residuos minero-metalúrgicos estudiados.

f) De acuerdo al pH, se ha podido comprobar que presentan rangos muy amplios, desde muy ácidos ($\text{pH} > 2$) a alcalinos ($\text{pH} > 7,5$) (Figura 5.18). Las diferencias de pH se deben al tipo de cuerpo mineral explotado y al tipo de roca. Si el cuerpo mineral explotado es piritoso los residuos presentan generalmente un pH ácido, si por el contrario los minerales se asocian a rocas carbonatadas el pH es muy superior.

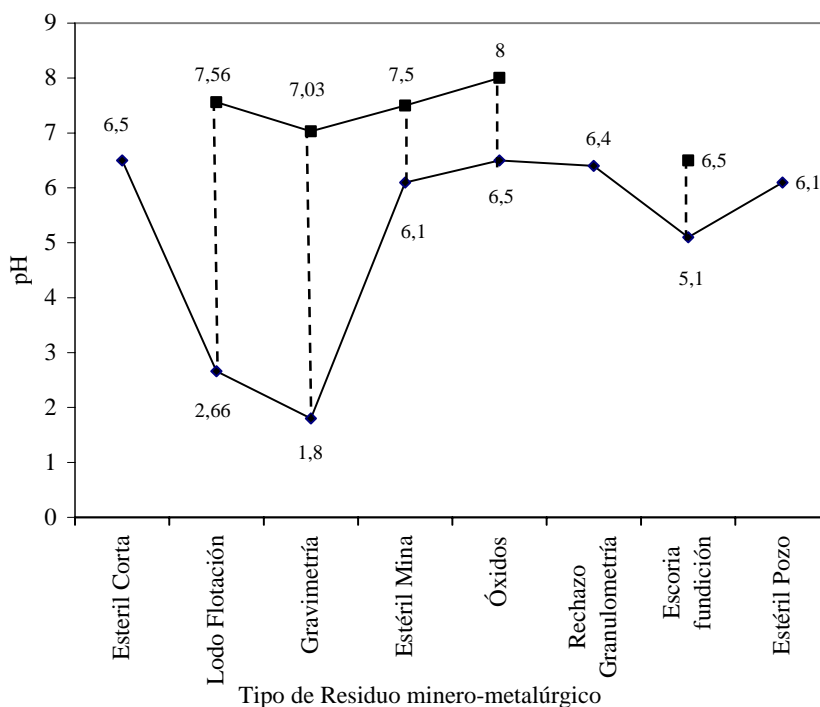


Figura 5.18. Variación de los valores de pH de cada tipo de residuo minero-metalúrgico

g) Según su composición química, en todos los residuos se puede apreciar la existencia de elementos contaminantes entre los que destacan el Pb, Cd, Zn y Cu. Estos elementos han sido detectados en las aguas superficiales, marinas, subterráneas y en las de precipitaciones (ver Capítulos 6 y 7), según la normativa descrita en el Capítulo 1.

CAPITULO 6. HIDROLOGÍA SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA. CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS

CAPITULO 6. HIDROLOGÍA SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA. CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS

El estudio del ciclo hidrológico, y la disponibilidad y calidad de los recursos hídricos de cualquier región, es una de las cuestiones prioritarias en el reglamento de las administraciones publicas (BOE 209, 31-8-88). Las características básicas de calidad de las aguas se fijan en los Planes Hidrológicos de Cuencas, el Libro Blanco del Agua y las directivas de la Comunidad Europea y española (R. D. 140/2003) y 98/83/CE). También en estos reglamentos y normativas quedan definidos los criterios relativos a los límites de vertido de aguas contaminadas a los cauces superficiales o al mar (Directiva, 76/464 CE, Orden MOPU del 12-11-87, 13-3-87 y MOPT del 28-6-91). Es sobradamente conocido que el ciclo hidrológico es único y que sus componentes juegan un papel muy importante en el flujo y transporte de contaminantes. En este Capítulo se caracterizan las composiciones químicas del agua de lluvia, las aguas superficiales y el agua subterránea.

Estos tres componentes del ciclo hidrológico son unos de los más afectados por los diferentes residuos minero-metalúrgicos inventariados en la Sierra de Cartagena-La Unión. Además, controlan el flujo y transporte de contaminantes y su evaluación y caracterización permiten evaluar el impacto ambiental que producen los citados residuos en el área de estudio y su radio de influencia.

6. 1. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DEL AGUA DE LLUVIA

El agua de lluvia constituye la principal fuente de alimentación de las aguas superficiales y subterráneas de la región. Para su estudio en el área, se ha realizado el muestreo desde el 14-10-2003 al 15-4-2004 de 20 episodios de lluvia, en dos estaciones pluviométricas: El Algar y Cabo de Palos (Figura 6.1).

Las características medias del agua de lluvia, en las estaciones termo-pluviométricas del Algar y Cabo de Palos, se relacionan en la Tabla 6.1. Si se comparan los valores medios de las dos estaciones, se puede observar que, la del Algar presenta siempre valores medios inferiores a los de la estación de Cabo de Palos. Ello es debido a que, por ejemplo el Cl⁻ es superior por su mayor cercanía al mar, y el aumento de los metales puede ser debido a la mayor frecuencia de los vientos del Este, en la misma dirección que la estación Cabo de Palos.

A continuación se relacionan diferentes parámetros, para las dos estaciones respectivamente El Algar y Cabo de Palos: pH = 6,97 y 7,14; CE = 77 y 200 μ S/cm; TSD = 51 y 159,6 mg/L; TAC = 13,6 y 52,4 y Dureza (DUR) = 20,2 y 26,42 mg/l de CO₃Ca (Tabla 6.1).

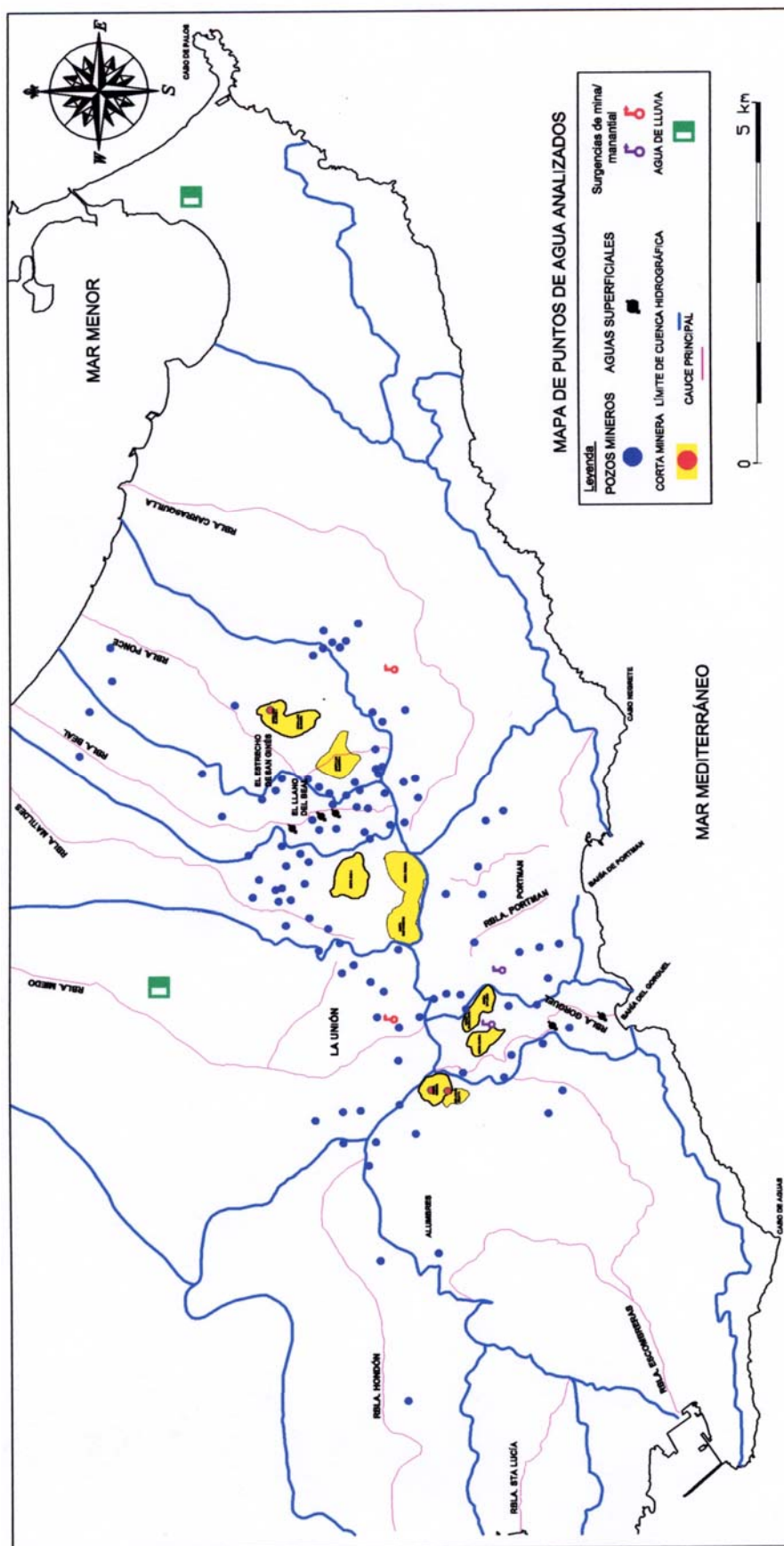


Figura 6.1. Mapa de distribución de los puntos de toma de muestras de agua analizados en la Sierra Minera y su radio de influencia. Mapa reducido del original a escala 1:25.000.

El anión predominante, en el 66% de las muestras, es el Cl^- , el resto son sulfatadas-bicarbonatadas en diferentes proporciones; en lo correspondiente a facies catiónica, un 45% de los análisis responde a facies sódica, un 33% a cálcica y un 22% a magnésica (Tabla 6.1, Figura 6.2).

Tabla 6.1. Características físico-químicas del agua de lluvia. (CE: conductividad eléctrica; TAC: alcalinidad total; DUR: dureza total; TDS: total de sólidos disueltos; DT: desviación estandar). Fecha de muestreo: 14-10-2003 a 15-4-2004.

Estación Pluviométrica	El Algar				Cabo de Palos			
Número de muestras	11				16			
Distancia a la costa (km)	5				0,1			
Cota absoluta m s.n.m.	40				1,0			
	Media	Máximo	Mínimo	DT	Media	Máximo	Mínimo	
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	77,36	140,00	15,00	33,16	200,06	867,00	44,00	216,16
pH	6,97	7,73	6,43	0,43	7,14	7,50	6,45	0,33
TAC (mg/l de CO_3Ca)	13,64	30,90	5,98	7,51	52,42	258,19	10,97	73,02
DUR (mg/l de CO_3Ca)	20,17	39,12	3,54	10,66	26,42	99,77	4,75	25,53
TSD (mg/l)	51,10	83,31	12,64	20,07	159,61	603,01	29,68	161,95
CO_3H^- (mg/l)	16,63	37,68	7,29	9,16	57,73	314,80	10,94	75,87
SO_4^- (mg/l)	9,21	18,29	1,35	5,56	22,11	85,64	2,91	24,81
Cl^- (mg/l)	10,84	21,08	2,14	6,21	20,67	72,17	4,36	19,03
NO_3^- (mg/l)	1,36	3,51	0,00	1,22	1,99	11,16	0,00	2,89
Na^+ (mg/l)	4,38	9,71	0,26	3,06	9,63	38,46	1,80	9,22
K^+ (mg/l)	0,45	0,87	0,05	0,22	4,91	35,36	0,28	9,10
Ca^{2+} (mg/l)	4,99	14,20	0,94	3,31	6,71	25,92	0,93	6,67
Mg^{2+} (mg/l)	1,87	6,26	0,29	1,65	2,54	8,51	0,45	2,20
NH_4^+ (mg/l)	0,39	1,42	0,00	0,39	9,18	73,50	0,14	18,17
$\text{Cl}^- + \text{NO}_3^-$ (mg/l)	12,20	22,32	2,14	7,11	22,65	73,45	4,36	19,99
$\text{Na}^{2+} + \text{K}^+$ (mg/l)	4,83	10,16	0,31	3,18	14,54	73,82	2,08	17,99
B (mg/l)	0,00	0,03	0,00	0,01	0,03	0,24	0,00	0,06
P_2O_5 (mg/l)	0,33	3,03	0,00	0,86	0,76	2,86	0,00	0,73
SiO_2 (mg/l)	0,54	2,20	0,14	0,60	1,68	20,46	0,14	5,02
Fe total (mg/l)	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,01
Mn (mg/l)	0,02	0,04	0,00	0,01	0,03	0,29	0,00	0,07
Ni (ppb)	4,65	11,26	0,44	3,82	1,85	9,41	0,00	2,66
Cu (ppb)	27,11	67,3	5,58	21,82	38,92	154,10	12,13	48,44
Zn (ppb)	27,8	64,49	8,89	19,21	27,95	138,41	9,15	38,06
Cd (ppb)	3,16	6,66	0,62	2,26	8,34	43,89	2,33	12,36
Pb (ppb)	24,11	70,71	4,72	23,85	6,81	31,95	2,99	8,51

El agua de lluvia se encuentra afectada por el aporte de polvo, finamente dividido, transportado por la erosión eólica a la capa superior de la atmósfera. En la Figura 6.2 se aprecia una correlación entre el volumen de precipitación (L/m^2) y la concentración de sulfatos y metales en el agua de lluvia. Si se analiza detenidamente la información de que se dispone se comprueba que en las muestras de tres días consecutivos de precipitaciones, la concentración de los elementos solubles en el primer día disminuye drásticamente y en los dos días siguientes (ver días del 161-163 y 175-177) la concentración se mantiene muy similar. Se piensa que la aparición del 80% del sulfato y de los metales (Pb, Ni, Cd, Zn y Cu) se debe fundamentalmente a la deposición sólida (es de señalar que el período de observaciones es pequeño, y que el número de eventos

de lluvias que tiene lugar en el área es muy escaso). Al parecer, el aporte de polvo, finamente dividido, que llega a la atmósfera, se debe a la erosión en las zonas desforestadas por las actividades mineras y a la erosión en los residuos y estériles minero-metalúrgicos existentes en la zona (ver Capítulo 5). El exceso de sulfatos y la presencia de metales en el agua de lluvia, es debido a la erosión de las costras de sulfatos existentes en la superficie de las balsas de lodos (Foto 6.1). Estas costras son sulfatos de muy baja densidad y gran contenido de metales.

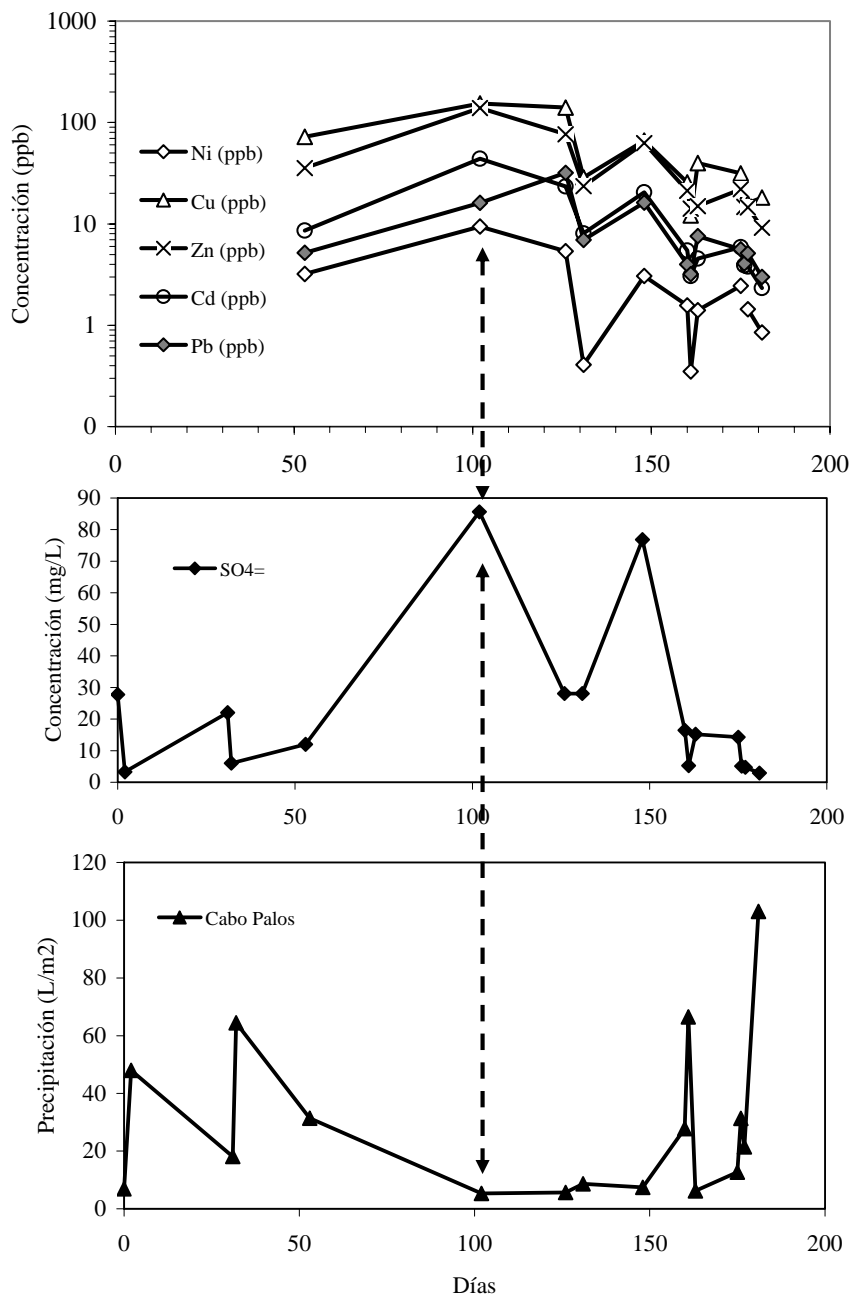


Figura 6.2. Variación de la concentración de sulfatos, Ni, Pb, Cd, Zn y Cu en relación con la precipitación por unidad de área (L/m²) en la estación “Cabo de Palos”.

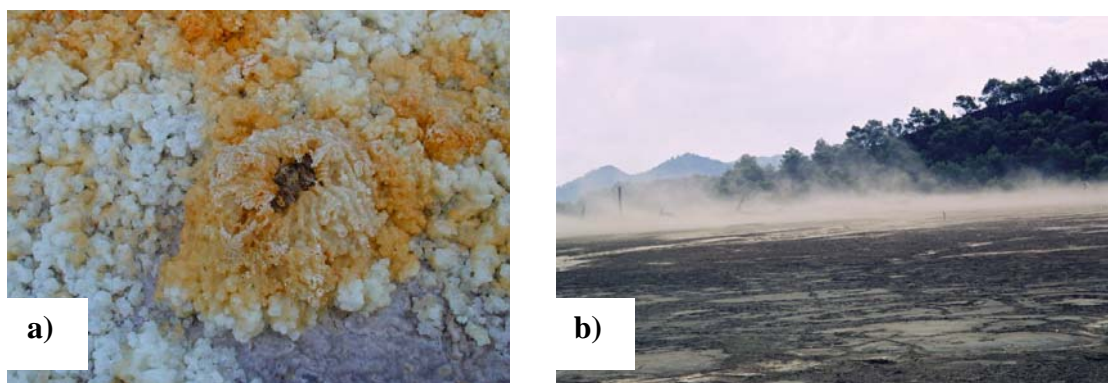


Foto 6.1. a) Costras de sulfatos en la balsa de lodos “Brunita”. b) Nube de polvo generada sobre la superficie de la balsa de lodos “Rosa”. Rambla del Beal

6.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE LAS AGUAS SUPERFICIALES

La red hidrográfica del área de estudio se caracteriza por la existencia de un gran número de ramblas cuyas cuencas hidrográficas son pequeñas (ver Capítulo 2, Figura 2.3). El flujo de agua en ellas tiene un carácter esporádico e intermitente. En este apartado solamente se hará referencia a las características físico-químicas de las aguas superficiales.

En la Tabla 6.2 se muestran las características físico-químicas de las aguas superficiales, determinadas en tres muestras de la rambla El Beal y dos en la del Gorguel (Figura 6.1). La analítica realizada corresponde a los elementos en disolución, ya que las muestras han sido filtradas por un filtro de 0,45 micras para eliminar los materiales en suspensión (ver Capítulo 3). Se puede apreciar que el pH y las concentraciones del ión sulfato y metales, superan los límites permitidos para vertidos, establecidos por el Reglamento de Dominio Público Hidráulico (R.D. 849/1986 y R.D. 606/2003), a los cauces de aguas superficiales o lagos. Estas aguas son las que llegan principalmente al Mar Menor y el Mar Mediterráneo, provocando la contaminación de éstos y afectando el desarrollo de sus ecosistemas (Fotos 6.2 y 6.3). Se puede ver en las mismas fotos la turbidez del agua de escorrentía superficial, debido a los sólidos en suspensión que transportan.

Tabla 6.2. Rangos de variación de las diferentes propiedades físico-químicas del agua de escorrentía de las ramblas el Beal (3 muestras) y el Gorguel (2 muestras). (CE: conductividad eléctrica; TAC: alcalinidad total; DUR: dureza total; TDS: total de sólidos disueltos; DT: desviación estandar). Valores medios (Med), valores mínimos (Mín), valores máximos (Máx) y valores límite de vertidos (V.L.) *española (R. D. 140/2003) y **europea (98/83/CE) para agua de consumo humano.

	Rambla El Beal				Rambla El Gorguel				v.p.*	v.p.**
	Med	Máx	Mín	DT	Med	Máx	Mín	DT		
CE (µS/cm)	5133,3	7330	3830	1913,38	5391,0	6952	3830	2207,59	2500	
pH	3,1	3,33	3	0,35	3,4	3,5	3	0,12	6,5-9,5	6,5-9,5
TAC (mg/l de CO ₃ Ca)	0,0	0	0	0,00	0,0	0	0	0,00	30	
DUR (mg/l de CO ₃ Ca)	2413,7	2931,21	2140	448,41	1582,7	2891,25	2741	1850,53	60	
TSD (mg/l)	5999,9	9242,81	4056	2826,83	6649,6	9242,81	4056	3667,42		
CO ₃ H (mg/l)	0,0	0	0	0,00	0,0	0	0	0,00		
SO ₄ ⁻ (mg/l)	5001,1	8126	3094	2728,03	8359,6	8894,2	7825	756,04	250	250
Cl ⁻ (mg/l)	75,9	88,62	59	15,54	74,2	78,56	70	6,22	250	250
NO ₃ ⁻ (mg/l)	10,0	16,75	6	5,88	13,7	15,18	12	2,16	50	50
Na ⁺ (mg/l)	35,6	42,6	31	6,24	34,9	41,26	29	8,95	200	
K ⁺ (mg/l)	0,8	1,61	0	0,81	1,1	1,2	1	0,17	150	
Ca ⁺⁺ (mg/l)	477,4	492,13	457	18,39	429,7	469,65	390	56,48	200	
Mg ⁺⁺ (mg/l)	296,7	434,83	221	119,82	334,1	434,31	234	141,71	50	
NH ₄ ⁺ (mg/l)	0,0	0	0	0,00	0,0	0	0	0,00	0,50	0,50
Cl ⁻ +NO ₃ ⁻ (mg/l)	86,0	97,31	66	17,23	87,8	90,68	85	4,06		
Na ⁺⁺ + K ⁺ (mg/l)	36,4	44,21	32	6,81	36,0	42,22	30	8,78		
Boro (mg/l)	0,3	0,46	0	0,11	0,2	0,29	0	0,07	1,00	1,00
P ₂ O ₅ (mg/l)	4,0	4,86	2	1,40	2,5	3,56	1	1,52		
SiO ₂ (mg/l)	33,3	37,89	29	4,62	34,6	47,11	22	17,76		
Hierro (mg/l)	1,9	2,48	2	0,52	1,8	1,88	2	0,07	0,200	0,200
Manganeso (mg/l)	62,9	70,72	51	10,37	67,5	69,97	65	3,48	0,050	0,050
Cd (ppm)	1,5	2,37	0	1,26	1,1	2,07	0	1,39	0,005	0,005
Ni (ppm)	0,8	1,28	0	0,65	0,5	0,98	0	0,64	0,020	0,020
Pb (ppm)	0,6	0,92	0	0,33	0,4	0,62	0	0,25	0,025	0,010
Sr (ppm)	1,0	2,3	0	1,14	1,2	2,3	0	1,53		
Zn (ppm)	59,6	83,29	12	40,94	47,6	82,99	12	50,00	5	



Foto 6.2. Escorrentía superficial en la rambla El Beal (desagua en el Mar Menor).



Foto 6.3. Escorrentía superficial en la rambla del Gorguel (desagua en el Mar Mediterráneo).

En el diagrama triangular de la Figura 6.3 se observa que las aguas de lluvia, que son la fuente de alimentación de las aguas superficiales, sufren una rápido incremento en la concentración de sulfatos como resultado del proceso de lavado superficial que desarrollan sobre las costras de sulfatos existente en la superficie de los residuos mineros. Sin embargo en el caso de los otros elementos (Cl, Na) no se aprecia un incremento tan significativo. Es de señalar que el recorrido del agua de escorrentía en el área de estudio y específicamente en las dos ramblas muestreadas es muy pequeño.

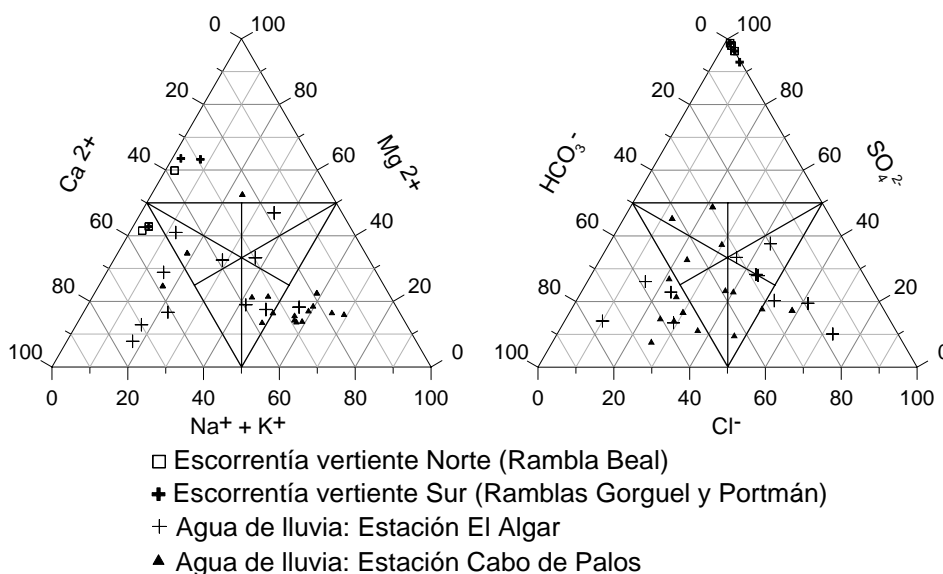


Figura 6.3. Diagrama triangular representando las facies aniónicas y catiónicas predominantes en tanto por ciento en peso en el agua de lluvia y en las superficiales.

6. 3. CARÁCTERÍSTICAS DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

6.3.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE LAS AGUAS DE CORTAS MINERAS

En la Tabla 6.3 se detallan las características físico-químicas del agua que ocupa permanentemente el fondo de dos cortas mineras (Figura 6.1), debido a que la superficie topográfica de éstas interceptan el nivel piezométrico. La corta Los Blancos-II almacena unos 107.250 m³ de agua (Foto 6.4), y la corta Brunita del orden de 845.325 m³ (Foto 6.5) (ver Capítulo 9, Tabla 9.2), habiéndose cortado en ambas materiales del complejo Nevado-Filábride (ver Capítulo 2).



Foto 6.4. Intercepción del nivel piezométrico por las actividades mineras a cielo abierto. Corta Los Blancos-II. Fecha de la Foto 29-09-04.



Foto 6.5. Intercepción del nivel piezométrico por las actividades mineras a cielo abierto. Corta Brunita. Fecha de la Foto 29-09-04.

De acuerdo con los resultados de los análisis químicos que se muestran en la Tabla 6.3 y considerando los valores paramétricos ó límite, establecidos para agua potable, se puede comprobar que las aguas de estas cortas no cumplen ninguno de los criterios de potabilidad establecidos; además, el hecho de estar en contacto con los acuíferos subterráneos, favorece el aporte de contaminantes a éstos. La aplicación de medidas correctoras a este problema puede ayudar a disminuir la contaminación de las aguas subterráneas existentes en su radio de influencia. En el caso de los contenidos en metales Fe, Mn, Cd, Pb, Zn y Cu, se supera, en más de dos órdenes de magnitud, la concentración establecida por las normativas españolas y de la Unión Europea.

Se trata de aguas altamente mineralizadas, muy ácidas, con pH de 2,53 a 3,03 debido al ambiente reductor que genera el proceso de oxidación de los sulfuros que consumen todo el oxígeno disuelto en el agua. También se puede observar como las aguas de la corta Brunita, pese a ser más ácidas que la de Los Blancos-II, tiene menos metales en disolución. Una explicación puede ser el hecho que la diferencia de temperatura es de 5 °C (19,7 frente a 24,8 °C). Esto se podría comprobar en un futuro, analizando agua en invierno y verano, comparando la concentración de metales para cada estación.

Tabla 6.3. Propiedades físico-químicas del agua de las dos cortas mineras. Valores paramétricos (v.p.) que son los niveles máximos marcados por cada normativa, *española (R. D. 140/2003) y **europea (98/83/CE) para agua de consumo humano.

	17/10/2003	30/09/2003	V.P*	V.P**
Fecha muestreo	17/10/2003	30/09/2003	V.P*	V.P**
Fecha análisis	03/12/2003	03/11/2003		
Corta minera	Brunita	Los Blancos II		
Litología dominante	Sulfuros + esquistos	Sulfuros + mármoles		
Coordenada X (m)	686417	692775		
Coordenada Y (m)	4164307	4167000		
Z (m s.n.m.)	124	20		
Mapa topográfico regional	977-83	978-12		
Rambla	Escombreras	Ponce		
¹ T (in situ °C)	19,70	24,80		
¹ pH (in situ)	2,80	3,36		
¹ CE (µS/cm)	12020	9990		
CE (µS/cm)	10390	9110	2500	
pH	2,53	3,03	6,5-9,5	6,5-9,5
TAC (mg/l de CO ₃ Ca) ^b	0	0,00	30	
DUR (mg/l de CO ₃ Ca) ^b	8034,40	6150,52	60	
TSD (mg/l)	12850,38	11936,48		
CO ₃ H ⁻ (mg/l)	0	0,00		
SO ₄ ⁼ (mg/l)	9516,00	9650,00	250	250
Cl ⁻ (mg/l)	593,23	263,66	250	250
NO ₃ ⁻ (mg/l)	9,43	2,08	50	50
Na ⁺ (mg/l)	390,02	162,00	200	
K ⁺ (mg/l) ^a	10,82	4,62	150	
Ca ⁺⁺ (mg/l) ^b	449,08	508,87	200	
Mg ⁺⁺ (mg/l) ^a	1678,74	1185,01	50	
NH ₄ ⁻ (mg/l)	0	0,00	0,50	0,50
Cl ⁻ +NO ₃ ⁻ (mg/l)	602,66	265,74		
Na ⁺⁺ + K ⁺ (mg/l)	400,84	166,62		
Boro (mg/l)	0,61	0,28	1,00	1,00
Anhídrido fosfórico (mg/l) ^b	4,54	3,10		
Anhídrido silicio (mg/l)	39,97	63,75		
Hierro (mg/l)	72,30	0,00	0,200	0,200
Manganeso (mg/l)	85,64	93,11	0,050	0,050
Cd (ppm)	0,16	0,96	0,005	0,005
Ni (ppm)	0,70	1,05	0,020	0,020
Pb (ppm)	0,17	0,77	0,025	0,010
Sr (ppm)	4,32	4,01		
Zn (ppm) ^b	159,92	581,6	5	

¹Valores medidos en campo. a) R.D. 1423/1982 y b) R.D. 1138/1990.

En el diagrama triangular de la Figura 6.4 se han representado las facies aniónicas y catiónicas de las aguas de las cortas mineras, las cuales son sulfatadas magnésicas.

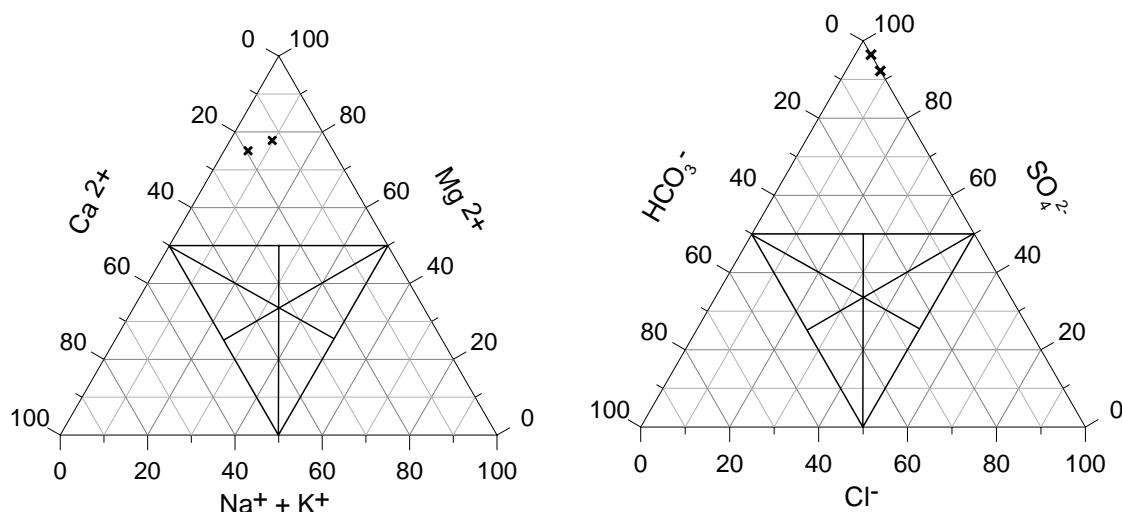


Figura 6.4. Diagrama triangular representando las facies aniónicas y catiónicas predominantes en tanto por ciento en peso en el agua de las cortas mineras.

6.3.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE LAS AGUAS DE SURGENCIAS DE MINAS

El drenaje ácido de aguas de minas, en el área de estudio, es escaso, aunque se pueden encontrar algunas galerías que interceptan el nivel piezométrico, y a través de ellas se produce el drenaje a las ramblas, como en el caso de una galería en la rambla de Portmán (Foto 6.6) y el túnel Lílían (Foto 6.7) en la del Gorguel (Figura 6.1). En la Foto se puede ver el precipitado rojo que produce el Fe en la salida de la galería y la presencia de costras de sulfatos producidas por la oxidación de los sulfuros en el Túnel Lílían.

En la Tabla 6.4 se relacionan las propiedades físico-químicas de las aguas de estas dos surgencias de mina. Se puede apreciar que, como ocurre con el agua de las cortas, éstas se caracterizan por presentar una elevada concentración de metales, y tampoco cumplen con las normativas de agua potable existentes en España y la Unión Europea (Tabla 6.4). Los valores establecidos, para los elementos mayoritarios como el sulfato y el magnesio, son ampliamente sobrepasados. En el caso de los metales pesados, los valores medidos en estas, superan, en más de un orden de magnitud, los límites establecidos por las normativas de agua potable.

También se observa una clara relación entre la litología de la galería de drenaje y la analítica de las aguas. En la galería de la rambla de Portmán, que atraviesa mármoles calcínicos, el pH y la concentración de calcio son más elevados que en el Túnel Lílían.



Foto 6.6. Galería de mina, en la rambla de Portmán.



Foto 6.7. Galería de mina. Túnel Lilian, en la corta Gloria.

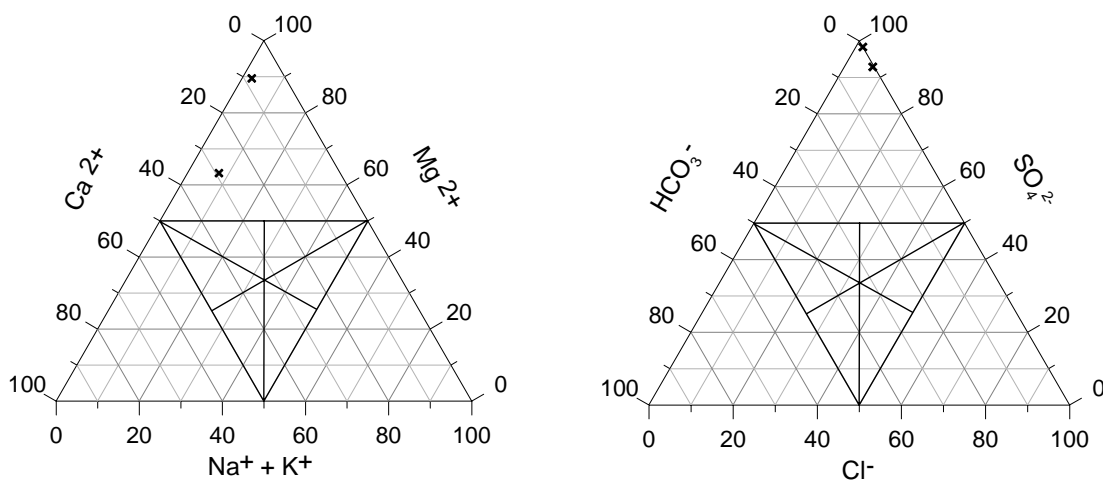


Figura 6.5. Diagrama triangular representando las facies aniónicas y catiónicas predominantes en tanto por ciento en peso en el drenaje de galerías mineras.

Tabla 6.4. Propiedades físico-químicas de las aguas de surgencias de galerías de mina. Valores paramétricos (v.p.) que son los niveles máximos marcados por cada normativa, *española (R. D. 140/2003) y **europea (98/83/CE) para agua de consumo humano.

	17/10/2003	17/10/2003	V.P*	V.P**
Fecha muestreo	17/10/2003	17/10/2003		
Fecha análisis	03/12/2003	03/12/2003		
Galería minera	Rambla Portmán	Túnel Lilian		
Litología dominante	mármoles	esquistos		
Coordenada X (m)	688402	687514		
Coordenada Y (m)	4163141	4163311		
Z (m s.n.m.)	70	171		
Mapa topográfico regional	977-84	977-84		
Rambla	Portmán	Gorguel		
¹ T (in situ °C)	21,60	20,50		
¹ pH (in situ)	6,05	2,67		
¹ CE (µS/cm)	5680	10350		
CE (µS/cm)	5010	9010	2500	2500
pH	5,67	2,30	6,5-9,5	6,5-9,5
TAC (mg/l de CO ₃ Ca) ^b	17,10	0	30	
DUR (mg/l de CO ₃ Ca) ^b	3530,59	4163,60	60	
TSD (mg/l)	5864,60	12429,09		
CO ₃ H ⁻ (mg/l)	20,85	0		
SO ₄ ⁼ (mg/l)	4234,00	10736,00	250	250
Cl ⁻ (mg/l)	227,04	131,83	250	250
NO ₃ ⁻ (mg/l)	0	9,11	50	50
Na ⁺ (mg/l)	129,65	44,18	200	200
K ⁺ (mg/l) ^b	6,30	1,13	150	
Ca ⁺⁺ (mg/l) ^a	449,74	139,28	200	
Mg ⁺⁺ (mg/l) ^b	584,65	926,62	50	
NH ₄ ⁻ (mg/l)	0,08	0	0,50	0,50
Cl ⁻ +NO ₃ ⁻ (mg/l)	227,04	140,94		
Na ⁺⁺ + K ⁺ (mg/l)	135,95	45,31		
Boro (mg/l)	0,26	1,49	1,00	1,00
P ₂ O ₅ (mg/l)	1,3	1,65		
SiO ₂ (mg/l) ^b	7,72	42,11		
Hierro (mg/l)	0,01	2,97	200	200
Manganeso (mg/l)	203	392,70	50	50
Cd (ppm)	0	2,27	0,005	0,005
Ni (ppm)	0,07	1,08	0,020	0,020
Pb (ppm)	0,17	0,62	0,025	0,010
Sr (ppm)	2,63	0,33		
Zn (ppm) ^b	124,28	838,09	5	

¹Valores medidos en campo. a) R.D. 1423/1982 y b) R.D. 1138/1990.

6.3.3. CARACTERÍSTICAS DE LA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA SIERRA MINERA

La Unidad Hidrogeológica de la Sierra Minera (UHSM), nombre que se le ha dado al área de estudio, incluye la denominada unidad hidrogeológica 07.51 Sierra de Cartagena de unos 69 km², propuesta por el IGME, (1996). La UHSM tiene una superficie aproximada de unos 100 km². Está constituida por materiales principalmente metamórficos (esquistos, filitas y mármoles), sedimentarios (tramos carbonatados de las unidades alpujárrides), y en menor parte por materiales volcánicos y detríticos. De todos ellos solo poseen porosidad primaria los materiales detríticos, material de relleno de pequeñas cuencas intramontañosas (serie transgresiva, potencia < 25 m). El resto de la unidad debe su porosidad secundaria a la fracturación tectónica (provocada por las distintas fases de compresión y distensión que ha sufrido la cordillera) y a factores antrópicos, como son los casi 2000 pozos mineros que atraviesan la columna de material geológico y las numerosas galerías mineras existentes en profundidad. De todos los materiales destacar los tramos carbonatados de los Complejos Alpujárride (potencia < 100 m) y Nevado-Filábride (espesor máximo de 60 m) que además de sufrir la fracturación alpina, sufrir carstificación y estar perforados por cientos de pozos mineros, se encuentran atravesados por kilómetros de galerías mineras de longitud y trazados desconocidos, ya que en ellos se encuentran los principales depósitos minerales, asociados al proceso hidrotermal que se generó con el emplazamiento de los materiales volcánicos existentes en la UHSM (ver Capítulo 2).

Todos los factores enumerados proporcionan a la UHSM una elevada complejidad estructural que unida a los efectos de las actividades mineras, dificultan poder establecer el modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico.

6.3.3.1. Piezometría y parámetros hidráulicos

Para llevar a cabo la elaboración del mapa piezométrico preliminar de la UHSM se ha dispuesto de la cota del nivel de agua en 388 pozos mineros o sondeos, así como la aproximación de la cota del fondo de algunos de ellos (Figura 6.6). Con estos datos se ha conseguido establecer las líneas isopiezas que se muestran en la Figura 6.7. Para ello se han tenido que obviar algunos datos que no respondían a esta tendencia general, valores puntuales que se han atribuido a niveles aislados, muy mal comunicados hidráulicamente.

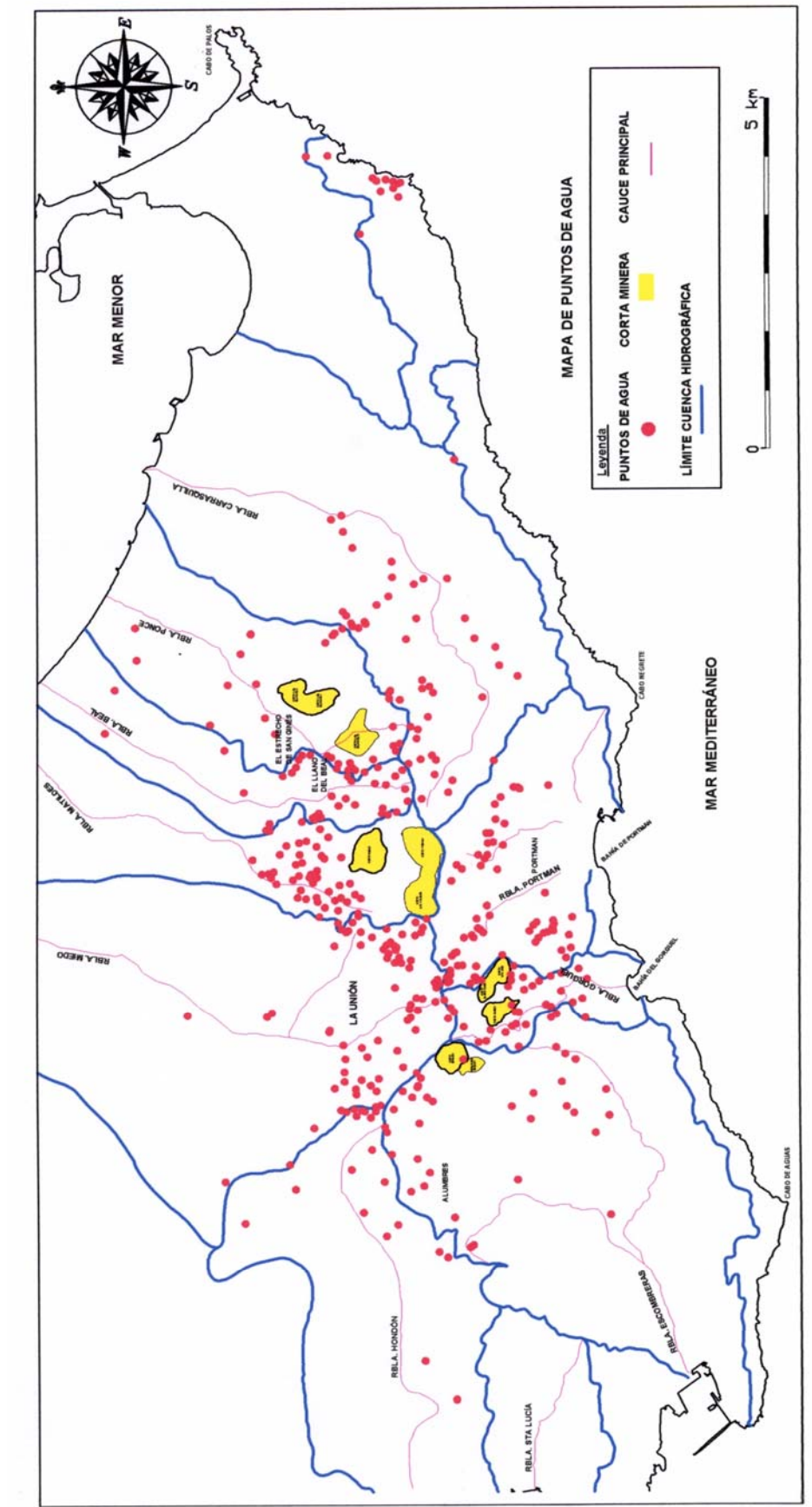


Figura 6.6. Mapa de distribución de todos los puntos de agua inventariados. Mapa reducido del original a escala 1:25.000.

De la observación de dicho mapa se puede deducir que existen cuatro bloques hidrogeológicos (A, B, C y D) (Robles-Arenas et al., 2004a), delimitados por fallas, que constituyen barreras hidráulicas para el flujo lateral (sistema N130E; Figura 6.7), no ocurre así con las del sistema de fracturación (N70E; Figura 6.7). Sin embargo, la comunicación hidráulica dentro de los bloques está favorecida por las galerías y pozos creados durante la explotación de las minas por interior, tal y como se puede apreciar en el perfil geológico de la corta Brunita (Figura 6.8), en el que se ven las numerosas galerías de las labores de interior, realizadas antes de la explotación a cielo abierto (corta).

Las características hidrodinámicas son muy variables. Se trata de un área minera con explotaciones a cielo abierto y subterráneas, en materiales geológicos altamente fracturados, siendo ambos factores los que provocan la existencia de un medio muy heterogéneo. Teniendo en cuenta que los cuerpos minerales explotados se localizan principalmente en las zonas de fractura, las condiciones de flujo esperables son complejas y de características muy diferentes a las de un acuífero en condiciones normales.

En el mapa piezométrico se aprecian dos direcciones de flujo subterráneo predominantes: hacia el NW en la vertiente septentrional de la Sierra Minera, y al SE en la meridional. El gradiente hidráulico es notablemente más elevado en la proximidad de la divisoria de aguas (0,04-0,07) (Figura 6.7), línea que coincide aproximadamente con la alineación que describen las cortas mineras. En el estudio de Carulla (1977) se aprecia que, al menos en el sector meridional, no existe relación de las aguas subterráneas con las cuencas hidrográficas superficiales, aspecto que coincide con los resultados observados en la mayoría de las cuencas hidrográficas del área estudiada. Solamente se produce vertido al cauce de la rambla de Portmán a través de una surgencia de galería de mina, aunque hay que señalar que el volumen de agua aportada es muy pequeño (inferior a 0,2 l/s), lo que dificulta observar su presencia en el cauce superficial.

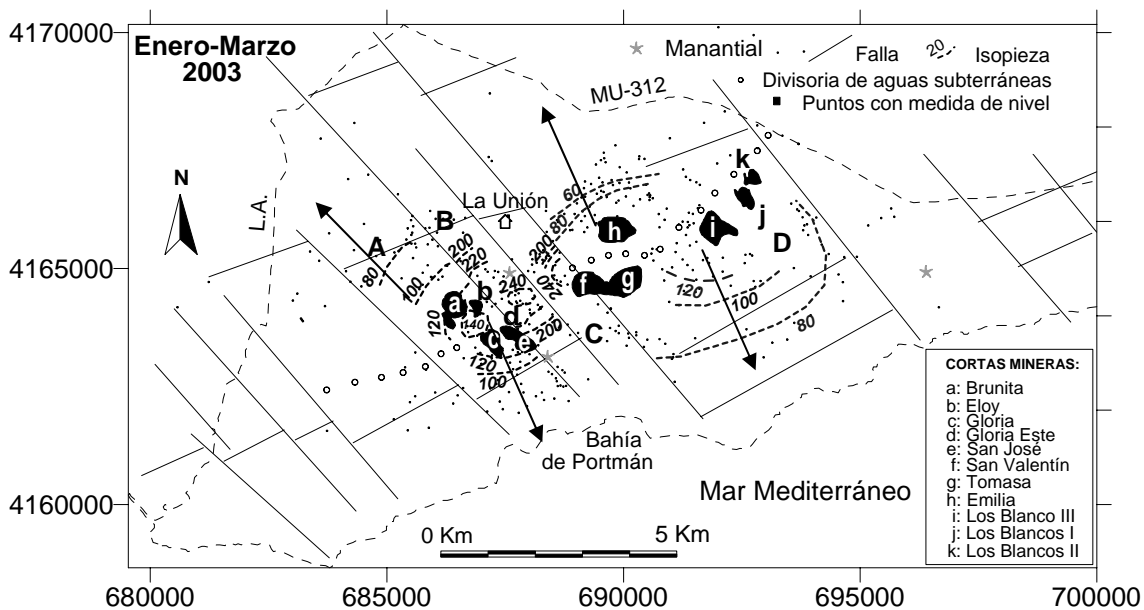


Figura 6.7. Mapa preliminar de isopiezas elaborado con los datos de niveles medidos en 388 pozos (Enero-Marzo de 2003). Los límites considerados para la zona de estudio son al W una línea arbitraria (L.A.), al S la línea de costa del mar Mediterráneo y al N el trazado de la carretera MU-312 (Robles-Arenas et al., 2004b).

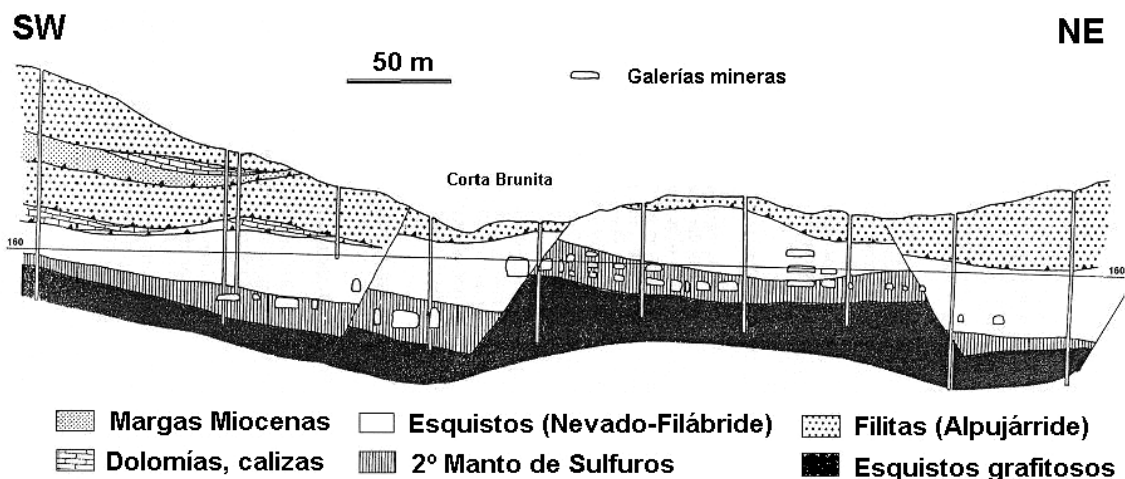


Figura 6.8. Perfil geológico general SW-NE del entorno de corta Brunita para apreciar la disposición de los diferentes materiales geológicos y de las galerías mineras (IGME, 1996).

El flujo de agua subterránea a nivel regional, está condicionado por los sistemas de fallas. La tectónica ha provocado que los potenciales materiales acuíferos queden aislados, al compartimentarlos en bloques y desplazarlos en la vertical, imposibilitando en algunos casos la comunicación hidráulica. Sin embargo, la comunicación hidráulica dentro de los bloques está favorecida por las galerías y pozos creados durante la explotación minera. Un rasgo común, en los acuíferos afectados por galerías subterráneas, es la existencia de huecos bien interconectados de diversa magnitud, que dan lugar al desarrollo de almacenamientos de agua. Estos depósitos poseen su propio nivel freático. Cuando se produce una subida paulatina del nivel del agua en el medio, se origina una transferencia de agua entre los distintos almacenamientos y la

correspondiente mezcla de éstas, adquiriendo los dos depósitos el mismo nivel piezométrico.

A partir de la reinterpretación de los datos de la recuperación de tres ensayos de bombeo realizados en 1977 (Carulla, 1977), con el objetivo del abastecimiento de agua a un lavadero de mineral, se han podido aproximar, en órdenes de magnitud, los parámetros hidráulicos. Los ensayos se realizaron en pozos mineros próximos a la corta Gloria (Figura 6.7; corta c), alcanzaban una profundidad entre 140-220 m (cota -33 a 22 m s.n.m.). Los valores de transmisividad obtenidos oscilan entre 10 m²/día (pozo que intercepta una zona de cizalla donde los materiales principalmente son filitas y micaesquistos) y 100 m²/día (pozo que atraviesa el paquete carbonatado alpujárride, acuífero intermedio, y probablemente alcance los mármoles nevado-filábrides, acuífero profundo). Es de señalar que en las cortas Brunita y Los Blancos-II, el nivel piezométrico se encontraba, en el año 1991, a más de 30 m de profundidad, con respecto al nivel piezométrico actual (por efecto del bombeo que se realizaba en la zona cuando la mina estaba en producción), sin embargo, éste se mantiene estabilizado hace más de 10 años en la cota actual (pues no existen bombeos) (ver Capítulo 9, Tabla 9.2), dando lugar a la formación de dos lagos permanentes de aguas ácidas con pH entre 2 y 3 (Fotos 6.4 y 6.5).

Respecto al flujo regional, en Solís *et al.*, (1988), se establecía que las descargas de la unidad serían de tres tipos; bombeos (zona norte y de escasa importancia, 1,4 hm³ en 1993, IGME, 1996), al Mar Mediterráneo por el Sur, y descarga subterránea a la unidad hidrogeológica del Campo de Cartagena, situada al Norte de la Sierra Minera.

6.3.3.2. Características físico-químicas de las aguas subterráneas

En la Tabla 6.5 se relacionan las principales características físico-químicas de las aguas subterráneas de la Unidad Hidrogeológica de la Sierra Minera (UHSM).

Conductividad eléctrica: los valores de conductividad medidos se extienden en un amplio rango comprendido entre 1000 µS/cm y 20000 µS/cm (Tabla 6.5, Figura 6.9). El 8% de las muestras superan los 10000 µS/cm⁻¹ de CE. En el 80% de las muestras el valor es superior al establecido en la norma de agua potable.

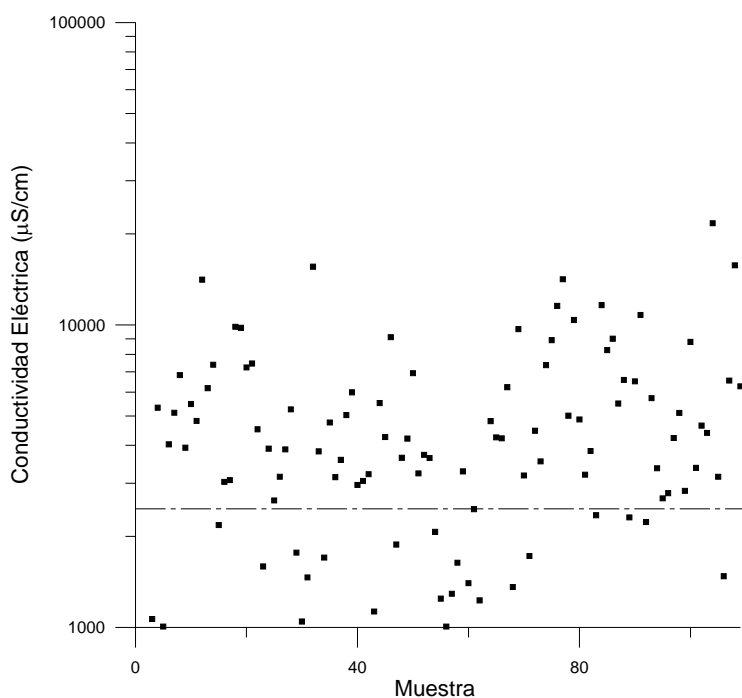


Figura 6.9. Variación del rango de CE de las 108 muestras de agua subterránea. La línea discontinua muestra el valor límite ($2500 \mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$ a 20°C) establecido para agua potable.

El pH: varía de ácido (2) a ligeramente alcalino (7,8) con un valor medio de 6,3 (Tabla 6.5). En la Figura 6.10, se aprecia que la mayoría de las muestras se encuentran, con un valor de pH, dentro del rango establecido por las normativas de agua potable, mientras que el 30% no cumple la normativa.

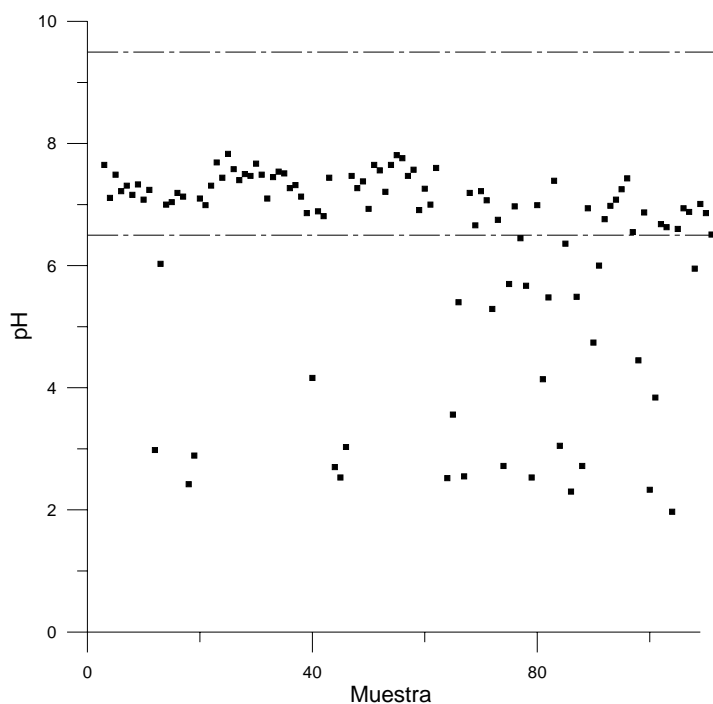


Figura 6.10. Variación del rango de pH de las 108 muestras de agua subterránea. Las líneas discontinuas muestran los valores límites (6,5-9,5) establecidos para agua potable.

TAC (Alcalinidad en CO_3Ca): es relativamente baja con valores entre 0-855 mg/L (Tabla 6.5). Los mayores valores se registran en el bloque hidrogeológico (BH) D (Figura 6.7). El hecho de que muchas muestras presenten valor cero, se debe al pH ácido de las muestras.

Total de sólidos disueltos (TSD): el total de sólidos disueltos presenta una gran variación (784 a 43600 mg/L) (Tabla 6.5). Los mayores valores se dan en el bloque hidrogeológico C (Figura 6.7). Puede corresponder con pozos cuya agua se encuentra estancada en su interior, pues no es posible establecer con claridad las líneas de flujo en este sector.

Tabla 6.5. Rangos de variación de las diferentes propiedades físico-químicas de las aguas subterráneas de la UHSM para 108 muestras. Valores medios (Med), valores mínimos (Mín), valores máximos (Max), desviación típica (DT) y valores paramétricos (v. p.), son los niveles máximos marcados por cada normativa, * española (R. D. 140/2003) y ** europea (98/83/CE).

	Med	Máx	Mín	D T	v. p.*	v. p.**
CE ($\mu S/cm$)	5081,3	21700,0	1007,0	3610,6	2500	2500
pH	6,3	7,8	2,0	1,6	6,5-9,5	6,5-9,5
TAC ($mg/l HCO_3^-$) ⁽¹⁾	184,7	854,8	0,0	160,4	30	
Dureza ($mg/l CaCO_3$) ⁽¹⁾	2557,0	15742,5	296,2	2294,7	60	
TSD (mg/l)	5395,8	43599,5	783,9	5675,7		
CO_3H (mg/l)	225,2	1042,0	0,0	195,3		
SO_4^- (mg/l)	3067,5	40310,0	54,7	4816,9	250	250
Cl ⁻ (mg/l)	757,5	5756,5	65,9	942,0	250	250
NO_3^- (mg/l)	8,8	136,2	0,0	18,6	50	50
Na^+ (mg/l)	373,6	1980,0	49,2	327,8	200	200
K^{+2} (mg/l)	24,1	319,8	3,4	37,5	12	
$Ca^{++(1)}$ (mg/l)	354,4	738,7	52,8	180,4	100	
$Mg^{++(1)}$ (mg/l)	396,7	3549,5	16,2	500,2	50	
NH_4^+ (mg/l)	0,9	37,23	0,0	4,48	0,5	0,5
Cd (mg/l)	0,3	7,95	0,0	1,07	0,005	0,005
Ni (mg/l)	0,2	3,8	0,0	0,56	0,020	0,020
Pb (mg/l)	0,1	2,8	0,0	0,36	0,025	0,025
Sr (mg/l)	2,5	9,42	0,0	1,91		
Zn ⁽¹⁾ (mg/l)	152,7	4093,1	0,0	571,29	5	
Boro (mg/l)	0,5	5,84	0,0	0,66	1,000	1,000
Hierro (mg/l)	19,3	1263,0	0,0	128,1	0,200	0,200
Manganeso (mg/l)	26,2	435,5	0,0	72,1	0,050	0,005
$P_2O_5^{(2)}$ (mg/l)	2,9	10,4	0,6	1,8	5	
SiO_2 (mg/l)	25,0	129,9	7,23	23,91		

⁽¹⁾ R. D. 1138/1990 (derogado por el RD 140/2003).

Dureza: el 90 % de las muestras de esta campaña se clasifican como muy duras (>540 ppm de $CaCO_3$, alcanzando valores superiores a los 15000 ppm de $CaCO_3$) (Tabla 6.5). Un 7% de las muestras son duras (320-540 ppm de $CaCO_3$), se localizan en la vertiente septentrional de la Sierra Minera principalmente. Las muestras correspondientes a los

manantiales de La Fuente y El Chorrillo, poseen durezas muy blanda y semiblanda respectivamente.

Aniones

Bicarbonato (HCO_3^-): constituye uno de los elementos mayoritarios de menor concentración en las aguas subterráneas. Presenta un rango de variación entre 0-1042 mg/L, en las muestras con pH ácido (menor de 4,5) su concentración es cero (Tabla 6.5), ello es debido a que el pH ácido y los bicarbonatos son antagónicos. Las mayores concentraciones se encuentran en el bloque hidrogeológico D (Figura 6.7).

Sulfato (SO_4^{2-}): es el elemento con más rango de variación (55-40310 mg/L) (Tabla 6.5). En la Figura 6.11, se aprecia como, solamente en 5 muestras, la concentración es inferior a lo establecido para considerar el agua como potable. Sus mayores concentraciones se registran en las zonas próximas a las cortas mineras, concretamente al bloque hidrogeológico C de la Figura 6.7. Esta elevada concentración probablemente se deba a un agua estancada en el interior del pozo minero muestreado. El origen es debido a la oxidación de los diferentes tipos de sulfuros existentes en la masa rocosa que pasan a sulfatos.

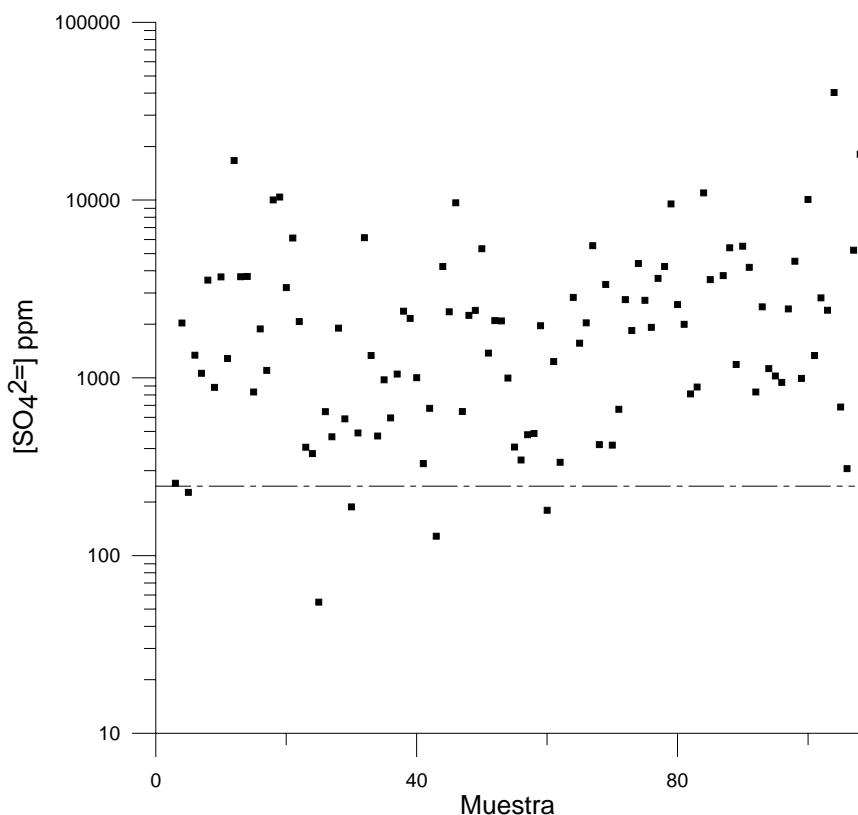


Figura 6.11. Variación del rango de sulfatos de las 108 muestras de agua subterránea. La línea discontinua muestra el valor límite (250 mg/l) establecido para agua potable.

Cloro (Cl): presenta una diferencia de concentración de dos ordenes de magnitud entre las muestras analizadas, con un rango que varia desde 66-5756 mg/L (Tabla 6.5). Las mayores concentraciones se encuentran en el BH-D (Figura 6.7), en los pozos afectados por la infiltración de los lixiviados de la corta Tomasa, que esta rellena de los residuos de flotación del Lavadero Roberto-II, que eran tratados con agua del Mar Mediterráneo.

Cationes

Calcio (Ca): de los elementos mayoritarios, el calcio es el que presenta la menor concentración, con un rango entre 53-739 mg/L (Tabla 6.5).

Magnesio (Mg): presenta un rango de variación de dos ordenes de magnitud entre la máxima y la mínima concentración (16-3550 mg/L) (Tabla 6.5). Las mayores concentraciones se encuentran en los bloques hidrogeológicos BH-A y D. En el caso del A, se corresponden con la zona de la corta Brunita, donde el agua está sometida a un intenso proceso de evaporación y en contacto con silicatos (talco, biotita, clorita), que presentan altas concentraciones de minerales ricos en Mg. En el BH-D se corresponde con la zona afectada por los lixiviados de la Corta Tomasa (Figura 6.7).

Sodio (Na): su origen es marino, se presenta en un amplio rango de concentraciones 49-1980 mg/L (Tabla 6.5). Las concentraciones más altas se encuentran en el bloque hidrogeológico C, en las cercanías de la corta Tomasa (Figura 6.7). Estas elevadas concentraciones se deben a que en la corta Tomasa se acumulan lodos de flotación del Lavadero Roberto-II, los cuales eran tratados con agua del Mar Mediterráneo. El hecho de que en el acuífero se encuentren concentraciones importantes de estos elementos se debe a la infiltración de los lixiviados, debido a que no existe una buena impermeabilización del lecho o fondo de la corta.

Anhídrido silícico (SiO₂): presenta un amplio rango de variación (7-130 mg/L) (Tabla 6.5). Los mayores valores se detectaron en el BH-D (Figura 6.7), en las cercanías de la corta Tomasa, en cuyo manto de silicatos se encontraba una gran cantidad de cuarzo relleno de grietas. La sílice está ligada a niveles profundos acuíferos.

Anhídrido fosfórico (P₂O₅): presenta bajas concentraciones entre 0,6-10 mg/L (Tabla 6.5). Las mayores concentraciones se corresponden al igual que el Cl y el Na, con el BH-D, donde el acuífero ha sido afectado por la infiltración de los lixiviados de la corta Tomasa (Figura 6.7).

Facies hidroquímicas

De acuerdo a los componentes mayoritarios de las 108 muestras de aguas subterráneas analizadas, se puede distinguir como facies aniónica predominante la sulfatada (81%), acompañada de varias facies catiónicas: magnésica (24 %), sódica (16 %) y cálcica (6%); el resto de las muestras responden a distintas proporciones de los tres cationes identificados en la zona de mezcla del diagrama triangular (Figura 6.12).

La facies aniónica predominante es la sulfatada, hecho que se explica por la oxidación de los sulfuros (pirita, galena, esfalerita, marcasita, etc.) que constituyen las mineralizaciones más importantes y que están presentes en los diferentes depósitos de estériles, residuos mineros y yacimientos minerales existentes en las zonas mineralizadas de la Sierra Minera. El grupo de muestras cloruradas se sitúan mayoritariamente en la vertiente Sur de la Sierra, en el entorno a las cortas de Tomasa y Los Blancos-I (Figura 6.7). En lo que respecta a la facies catiónica, los tres grupos principales responden a: I) magnésicas: son aquellas muestras correspondientes a aguas en contacto con filitas (arcillas en general, montmorillonita, illita, moscovita, cuarzo y carbonatos) y calizas dolomíticas; II) sódicas: pueden ser el resultado de la recarga de agua de lluvia; III) gran grupo: que responde a una mezcla de todos los cationes considerados (Figura 6.12).

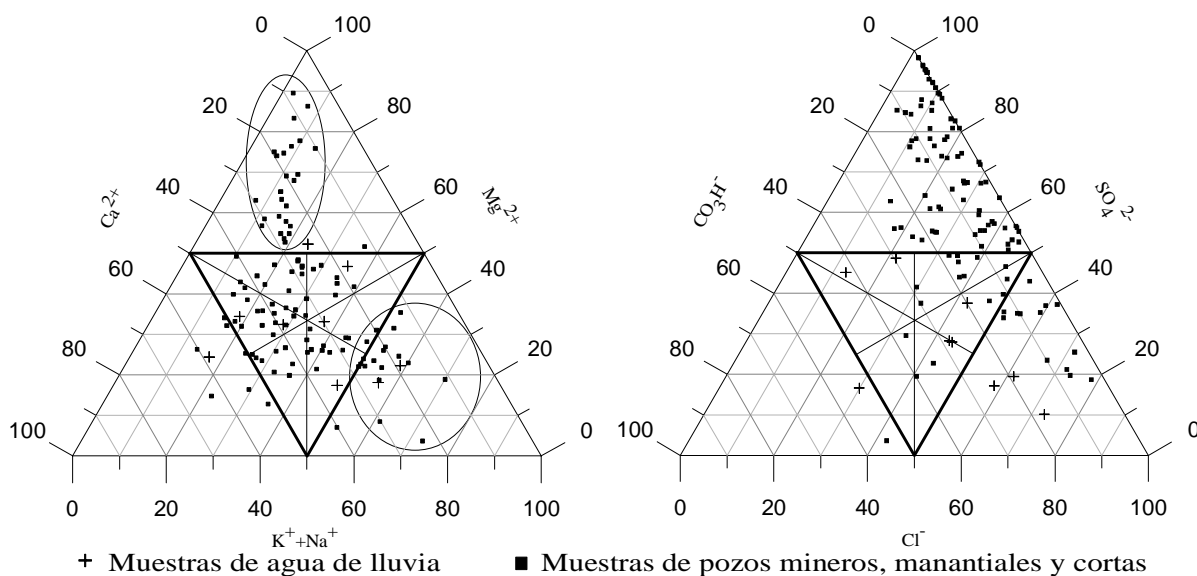


Figura 6.12. Diagrama triangular representando las facies aniónicas y catiónicas predominantes en tanto por ciento en peso.

Si se compara la composición química del agua de lluvia que recarga los acuíferos, con la del agua subterránea, se observa que las aguas de infiltración sufren un importante enriquecimiento en los aniones (sulfatos) y cationes (Mg y Ca), presentes en las rocas y los residuos de la Sierra Minera (Figura 6.12).

6.3.3.3. Comportamiento de los metales

Uno de los principales problemas, generados por las actividades minero-metalúrgicas, es la contaminación de las aguas subterráneas con diferentes tipos de metales (Pb, Zn, Cd, Ni, Sr, Fe, Mn). El contenido en metales pesados en las aguas subterráneas, se caracteriza por tener un amplio rango de variación. A continuación se analiza el comportamiento de cada uno de ellos.

Zn: presenta concentraciones muy variables ($\leq 0-4093$ mg/L) (Tabla 6.5). Es uno de los contaminantes más abundantes; fue detectado en 80 de las 108 muestras de agua subterráneas analizadas (Figuras 6.13, 6.21 y 6.22). Los mayores valores aparecen en el bloque hidrogeológico C y en segundo lugar el bloque D. En el bloque C, su elevada concentración puede estar relacionada con aguas estancadas, pues es en éste donde no se aprecia, con claridad, la existencia de un flujo subterráneo importante. El origen del Zn se debe a la oxidación de los sulfuros y su posterior lavado y lixiviado por las aguas de infiltración y las subterráneas.

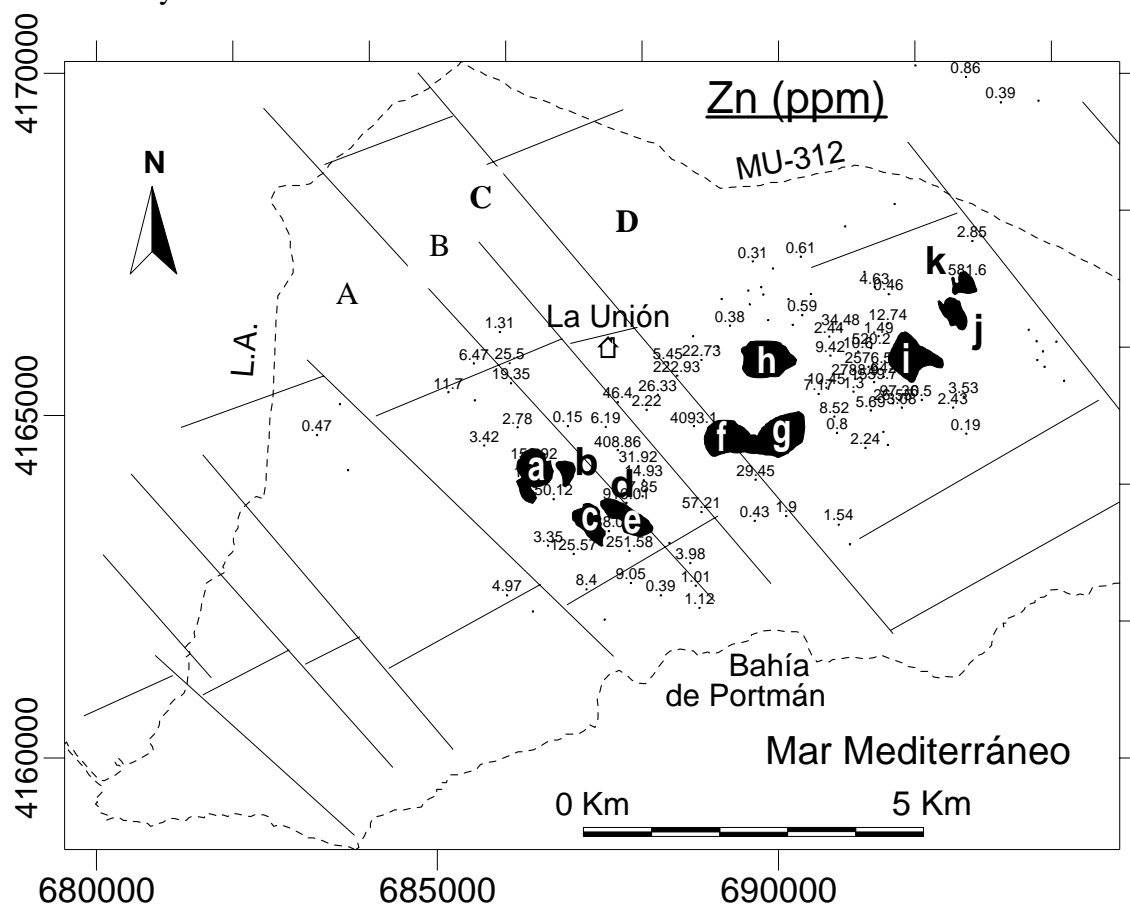


Figura 6.13. Representación de la concentración de Zn en el agua subterránea de la UHSM. a-k: cortas mineras (ver figuras 6.7 y capítulo 4, apartado 4.2).

Cd: su concentración varía entre 0-7,95 mg/L (Tabla 6.5, Figuras 6.14, 6.21 y 6.22). Los mayores valores se encuentran en los bloques hidrogeológicos C y D. Se detectó por primera vez en el año 1973 en la corta Los Blancos, en inclusiones de hawleyita en la blenda o de greenockita (CdS) alrededor o en los mismos cristales de galena, sobre todo en las zonas caolinizadas (informe interno SMMPE). Los máximos están relacionados, al parecer, con las zonas afectas por el lixiviado de la corta Tomasa (que se encuentra rellena de los lodos de flotación del Lavadero Roberto-II).

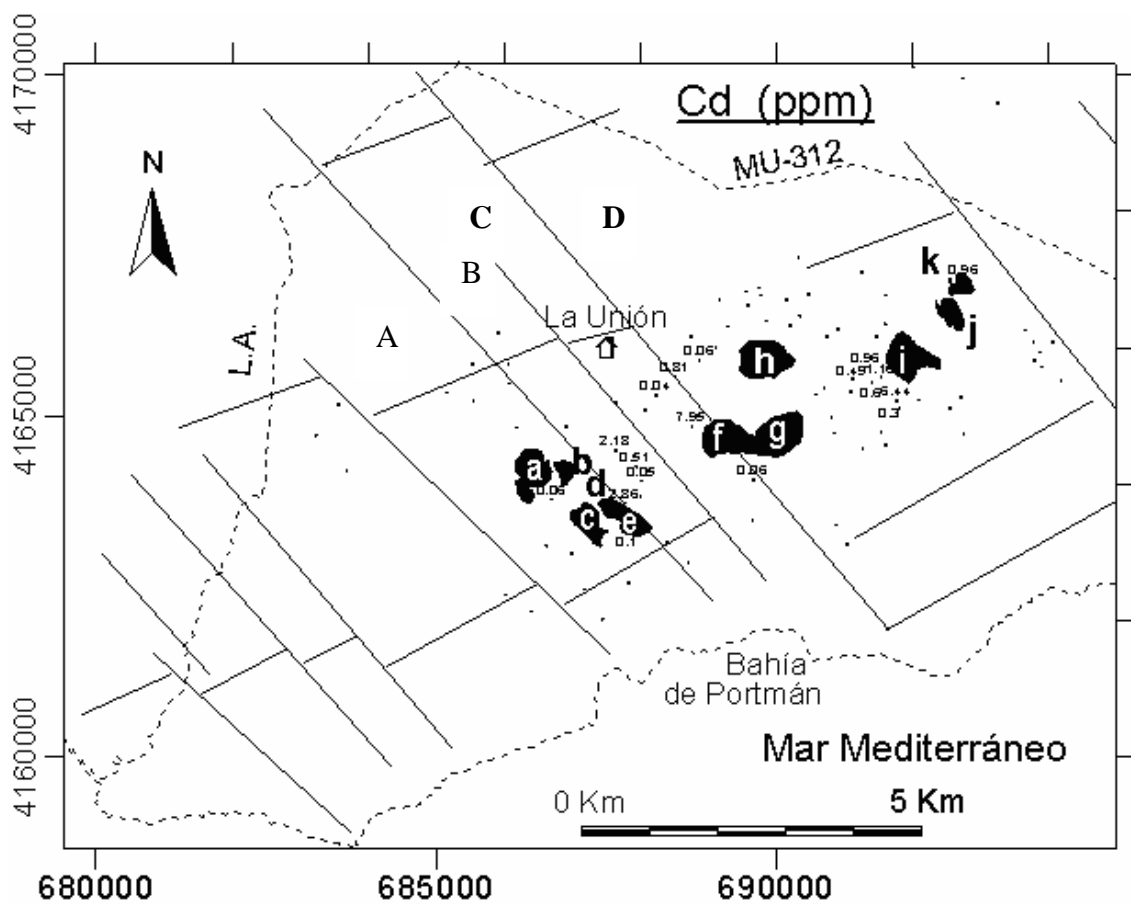


Figura 6.14. Representación de la concentración de Cd en el agua subterránea de la UHSM. a-k: cortas mineras (ver figuras 6.7 y capítulo 4, apartado 4.2).

Ni: presenta una concentración entre 0-3,8 mg/L (Tabla 6.5, Figuras 6.15, 6.21 y 6.22). Sus mayores valores se encuentran en el bloque hidrogeológico B. Su origen se relaciona con los procesos de oxidación de sulfuros (sulfuros de Fe). Normalmente el Ni aparece como impureza en estos minerales, que al oxidarse, dan lugar a sulfatos altamente solubles en agua.

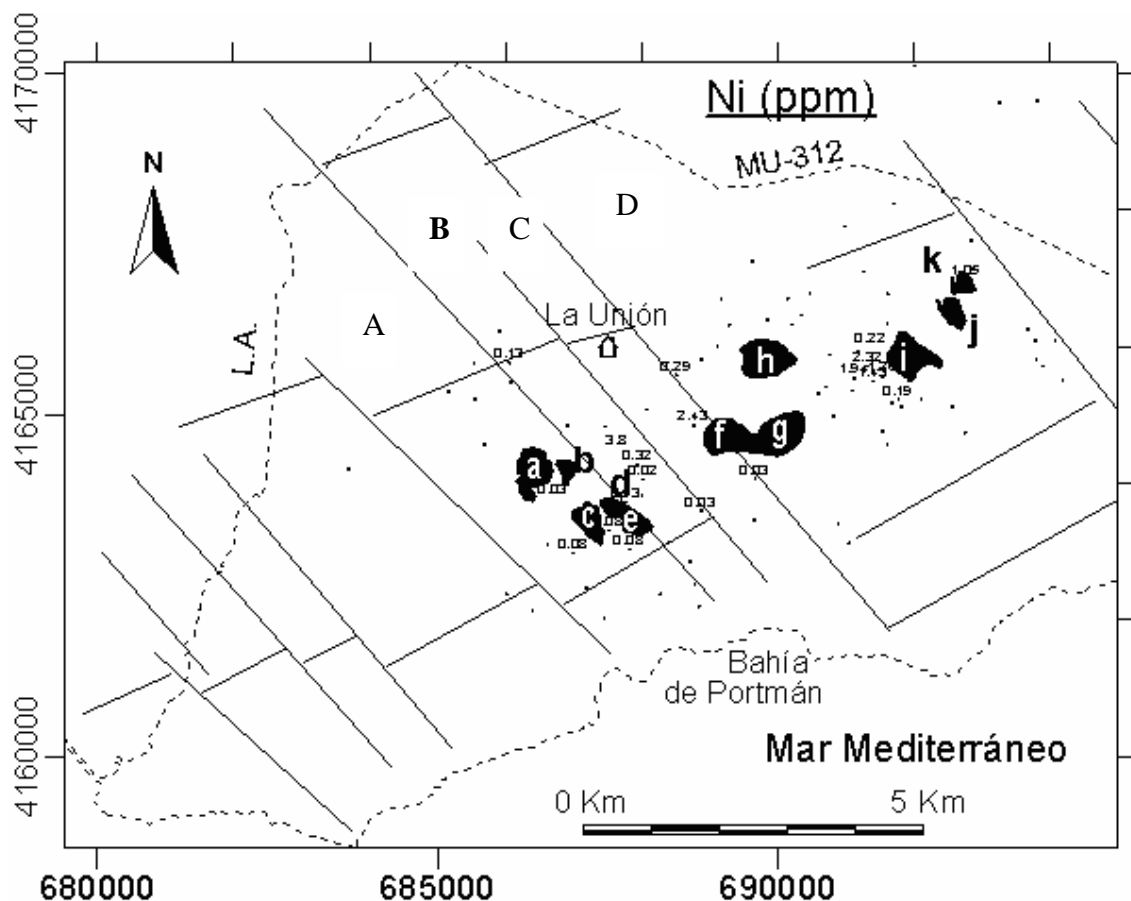


Figura 6.15. Representación de la concentración de Ni en el agua subterránea de la UHSM. a-k: cortas mineras (ver figuras 6.7 y capítulo 4, apartado 4.2).

Pb: presenta concentraciones variables entre 0-2,8 mg/L (Tabla 6.5, Figuras 6.16, 6.21 y 6.22). Se encuentra fundamentalmente en las muestras de pH ácido. Los mayores valores están en el bloque hidrogeológico D; esto puede estar relacionado con la intersección del nivel freático por la corta los Blancos-II, la cual presenta un pH ácido y gran concentración de sales.

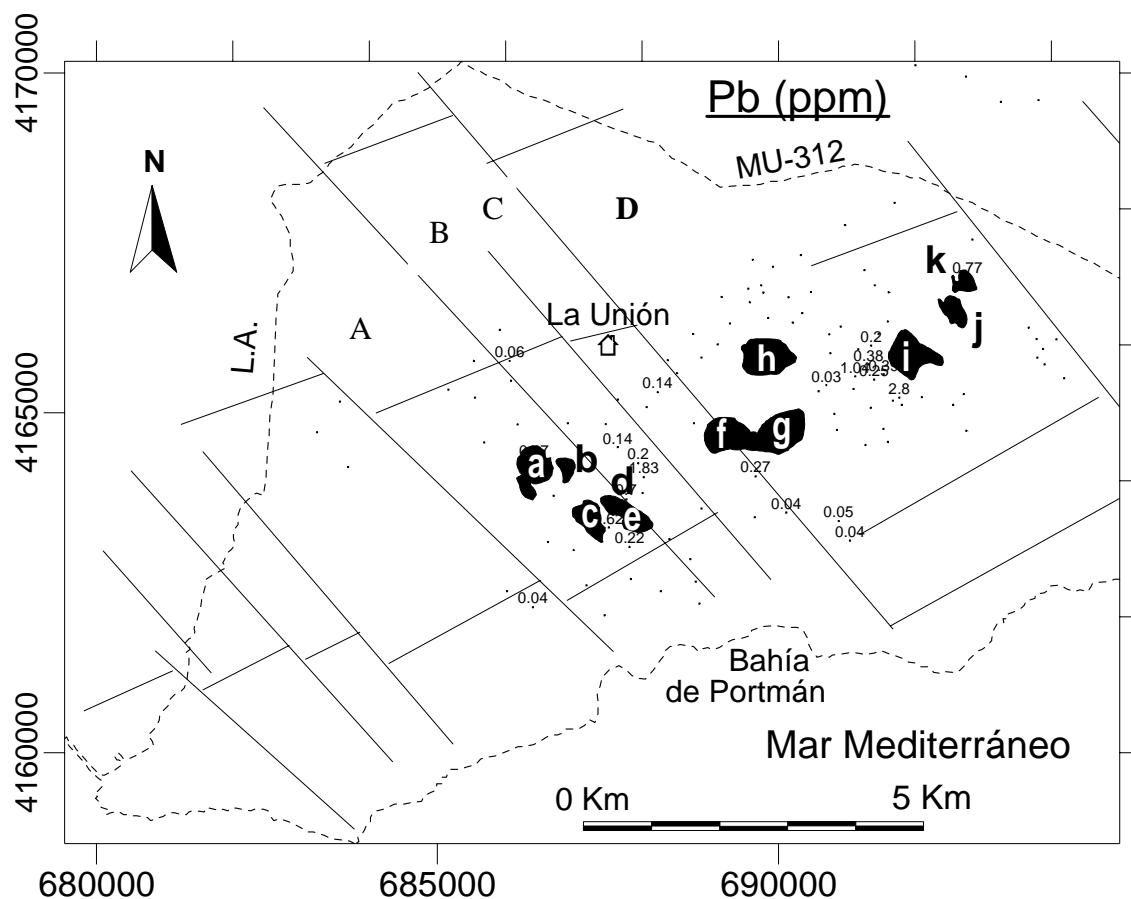


Figura 6.16. Representación de la concentración de Pb en el agua subterránea de la UHSM. a-k: cortas mineras (ver figuras 6.7 y capítulo 4, apartado 4.2).

Sr: presenta un rango de variación muy amplio (-9,42 mg/L) y una desviación estándar de 1,9 (Tabla 6.5, Figuras 6.17 y 6.21). Se encuentra presente en todas las muestras de agua subterránea analizadas. Las mayores concentraciones se encuentran en las aguas subterráneas afectadas por los lixiviados que se infiltran de la corta Tomasa (donde se almacenan los lodos de flotación del Lavadero Roberto-II). Su origen esta relacionado con los materiales geológicos (aparece Celestina en la corta Tomasa) y el uso de agua de mar en los procesos metalúrgicos.

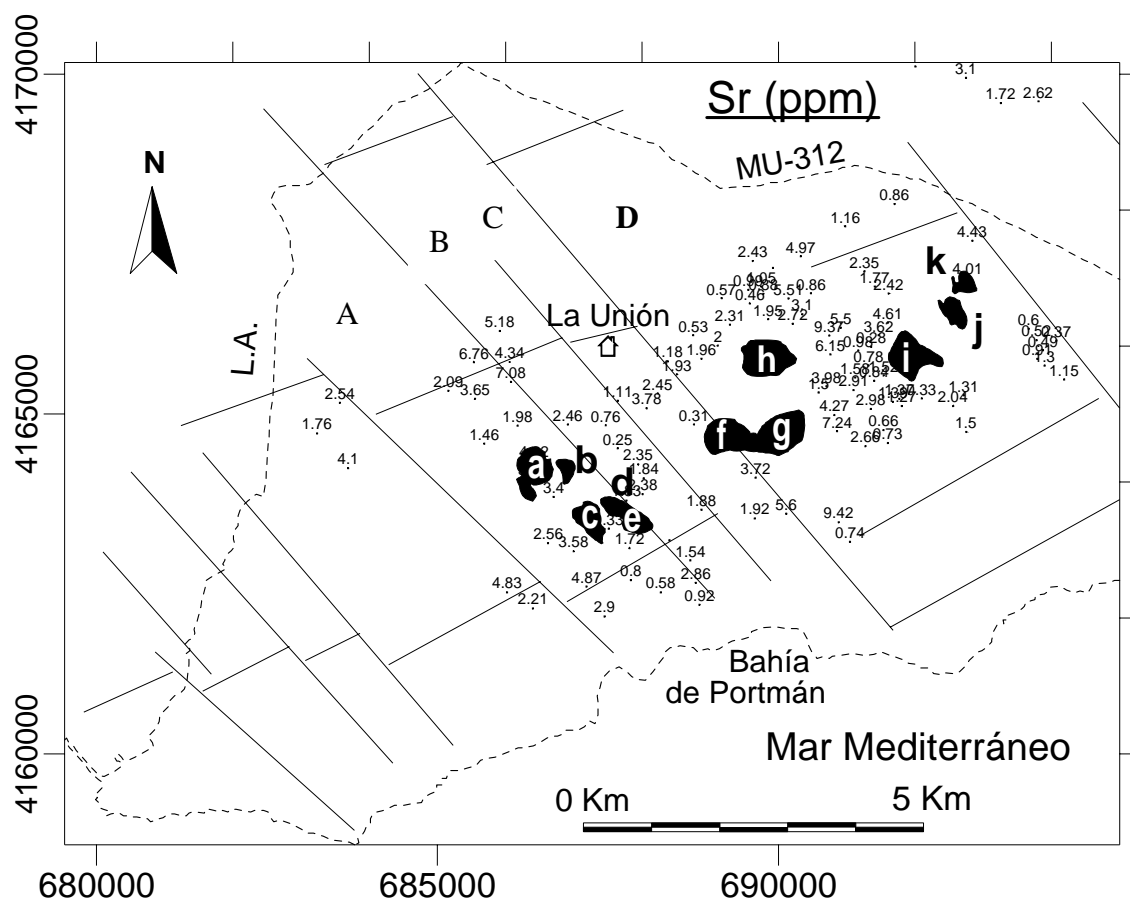


Figura 6.17. Representación de la concentración de Sr en el agua subterránea de la UHSM. a-k: cortas mineras (ver figuras 6.7 y capítulo 4, apartado 4.2).

Fe: las concentraciones presentan un rango de variación de tres ordenes de magnitud (0-1263 mg/L) (Tabla 6.5, Figuras 6.18, 6.21 y 6.22). Las mayores concentraciones se corresponden con la corta Brunita (Figura 6.4, Foto 6.5). En esta corta se encuentran los mayores volúmenes de manto piritoso, y los estériles extraídos se han depositado, en parte, sobre la balsa de lodos “Brunita” situada en sus alrededores.

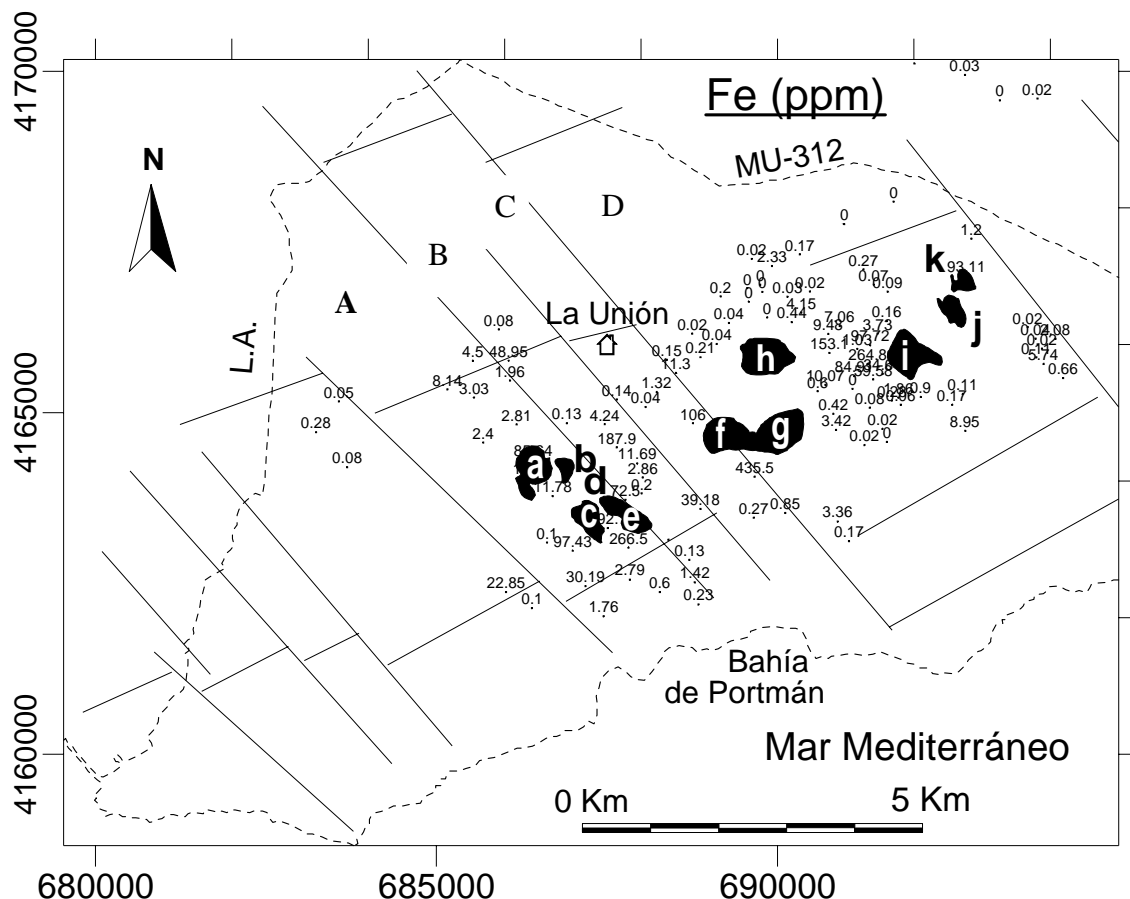


Figura 6.18. Representación de la concentración de Fe en el agua subterránea de la UHSM. a-k: cortas mineras (ver figuras 6.7 y capítulo 4, apartado 4.2).

Mn: presenta, como casi todos los contaminantes, un amplio rango de concentraciones (0-435 ppm) (Tabla 6.5, Figuras 6.19, 6.21 y 6.22). Los mayores valores se encuentran en los bloques hidrogeológicos A y D. Las concentraciones en el BH-A están relacionadas con las cortas Brunita y Eloy, donde se encuentran las mayores acumulaciones de sulfuros ricos en pirita. Además, la corta Eloy está rellena con estériles, ricos en pirita, procedentes de la corta Brunita (Foto 6.5, Tabla 4.4) y además, esta corta intercepta el nivel freático y las aguas de este lago de origen antrópico, se caracterizan por presentar grandes concentraciones de metales en disolución y $\text{pH} = 2$.

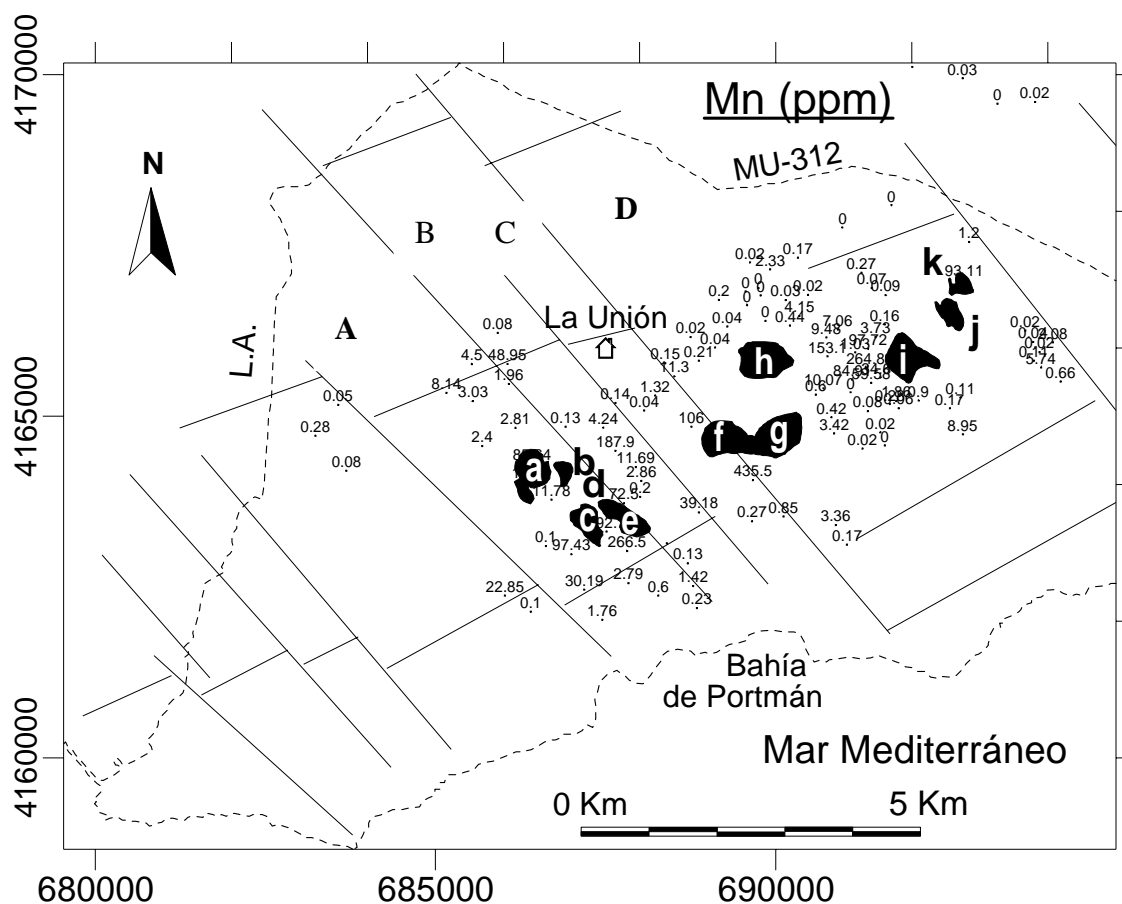


Figura 6.19. Representación de la concentración de Mn en el agua subterránea de la UHSM. a-k: cortas mineras (ver figuras 6.7 y capítulo 4, apartado 4.2).

B: presenta una concentración entre 0-5,8 mg/L (Tabla 6.5 y Figura 6.21). Los mayores valores se encuentran en bloque hidrogeológico C, en las cercanías de la corta Tomasa, donde se han producido las infiltraciones de los lixiviados de los residuos de flotación producidos por el Lavadero Roberto-II, que eran tratados con agua de mar.

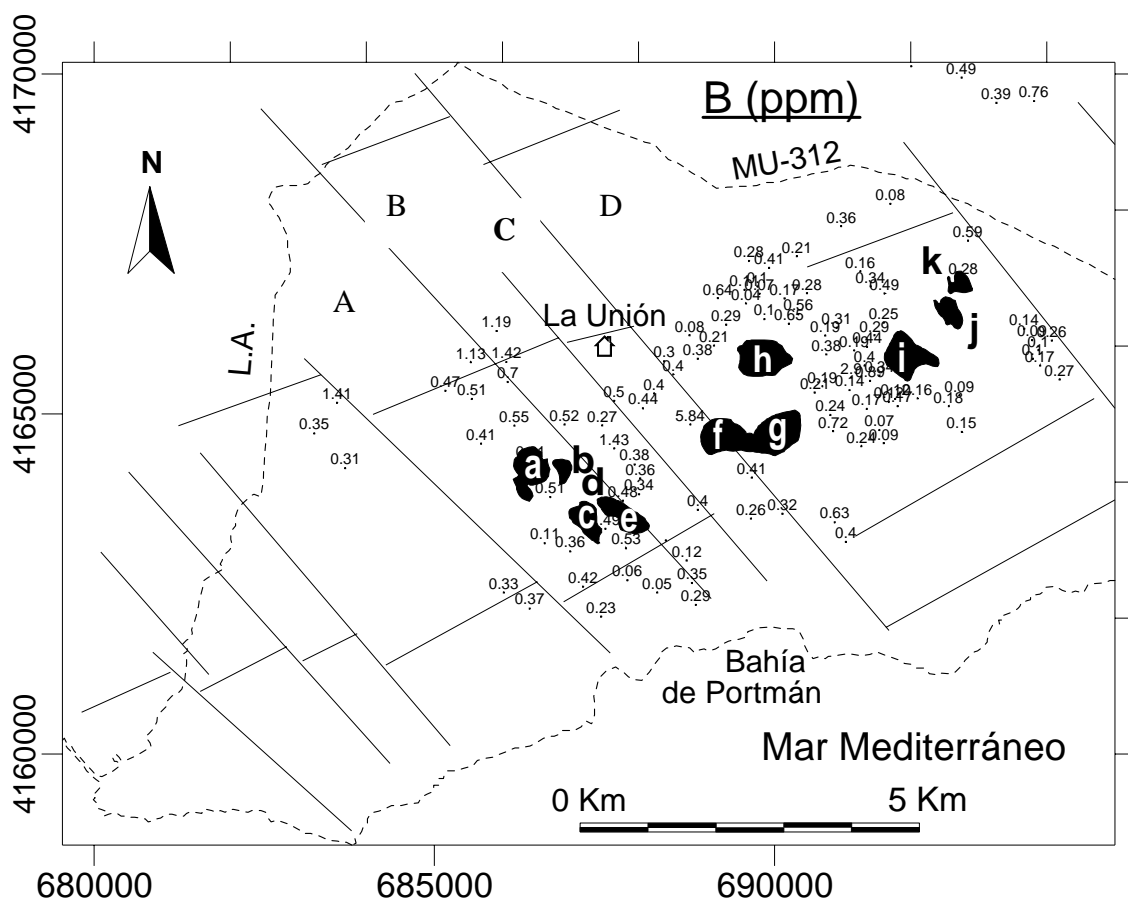


Figura 6.20. Representación de la concentración de B en el agua subterránea de la UHSM. a-k: cortas mineras (ver figuras 6.7 y capítulo 4, apartado 4.2).

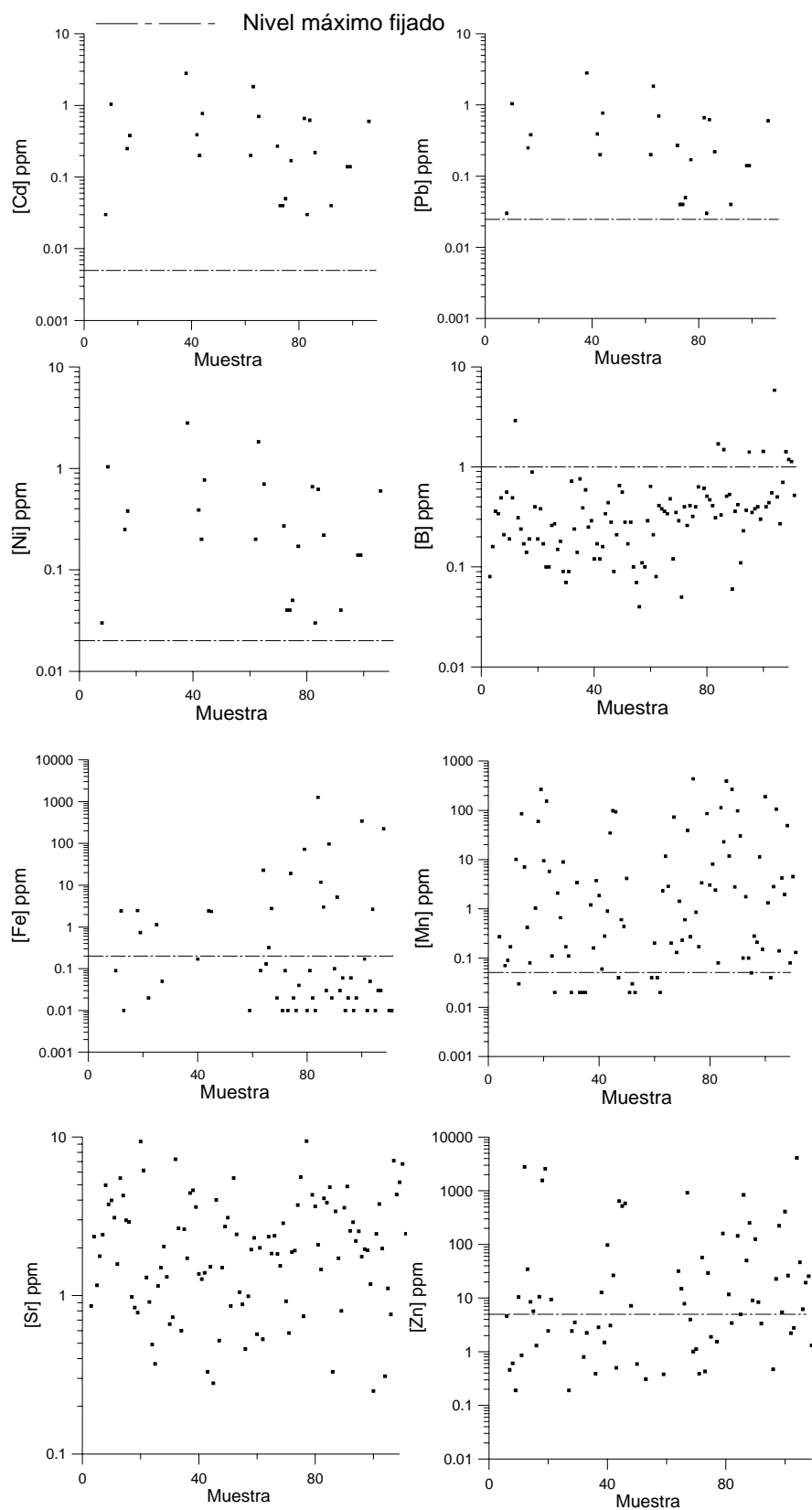


Figura 6.21. Representación de la concentración de los metales (Pb, Cd, Ni, B, Fe y Mn) en las 108 muestras analizadas en la campaña del 2003 y el valor límite establecido para el consumo humano (ver Tabla 6.5).

En la Figura 6.22 se han representado los valores de pH vs. logC de las muestras de aguas analizadas. A partir de las cuales se puede comprobar como varía la concentración de cada estado de oxidación de los iones en función del pH de las aguas.

Se puede apreciar la existencia de metales en las aguas subterráneas para valores de pH comprendidos entre 2 y 8. El pH 7,8 representa una barrera geoquímica, a partir de la cual se produce una caída brusca de la concentración de los diferentes metales. Se puede observar en la Figura 6.22, que los metales que tienen más presencia en las muestras de agua subterráneas, son el Zn y el Mn. La existencia de metales en el rango de pH entre 6 y 8 se debe a la existencia de partículas coloidales o en forma de hidróxidos. La existencia de partículas coloidales en las aguas subterráneas se justifica claramente con la concentración de sílice en el agua como lo muestra la Tabla 6.5. Resultados similares han sido obtenidos por Rodríguez, (2002) en zonas contaminadas por metales pesados.

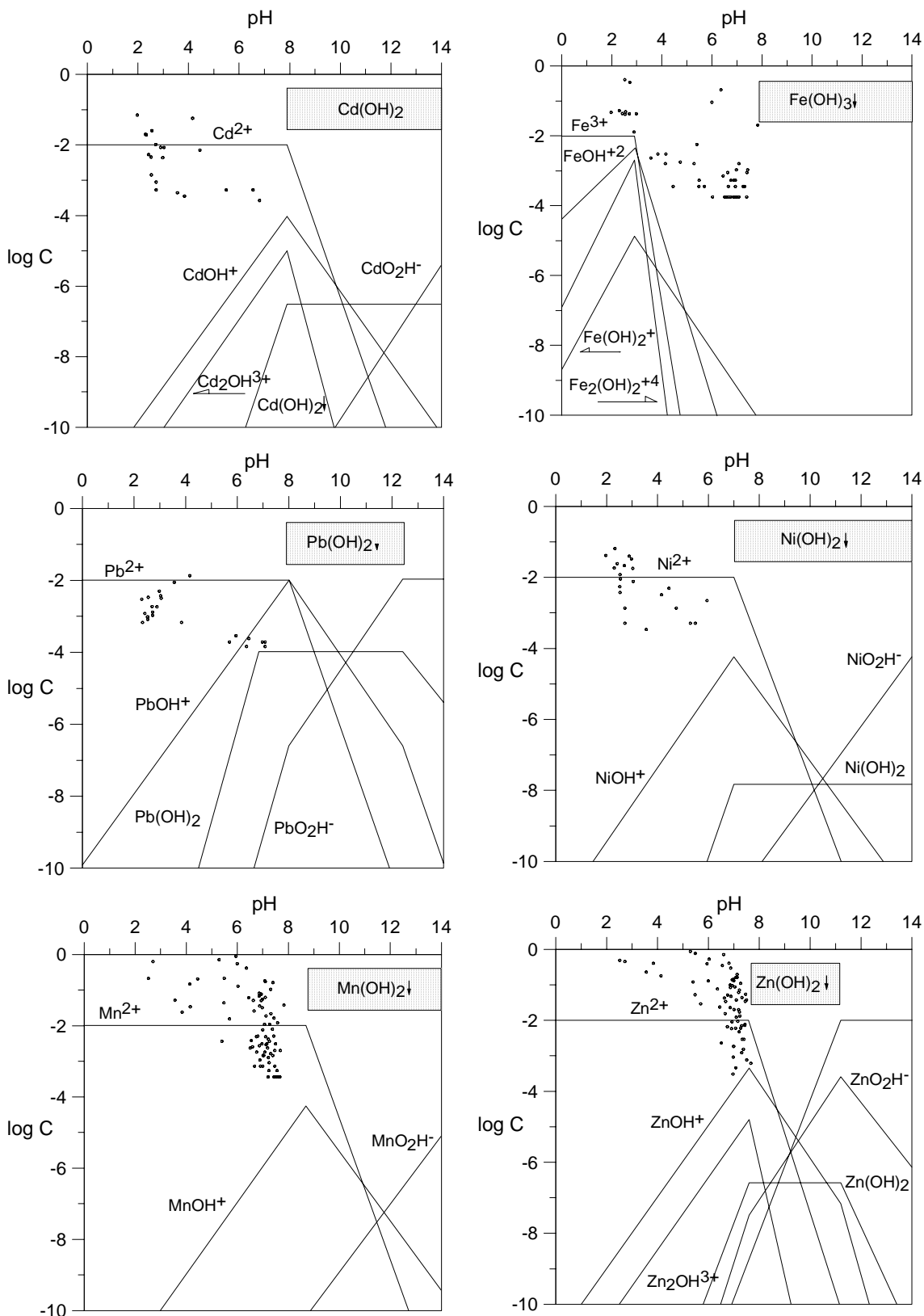


Figura 6.22. Valores de pH vs. Log C (concentración de metal) de las muestras de aguas subterráneas analizadas.

6.3.3.4. Calidad de las aguas subterráneas

Aptitud para consumo humano

En la Tabla 6.5 se muestran los rangos de variación (valores medios, máximos, mínimos y desviación estándar) de las diferentes propiedades físico-químicas determinadas en las 108 muestras de aguas subterráneas analizadas, para ser comparados con los parámetros establecidos tanto con la normativa europea como por la española. Los datos revelan que la mayoría de las aguas no son aptas para consumo humano, salvo cuatro de ellas que presentan valores inferiores a los valores paramétricos marcados, es conveniente señalar que para establecer esta “aptitud”, es obligatorio analizar la totalidad de parámetros marcados por las normativas.

En lo que respecta a las propiedades organolépticas, la mayoría de las muestras, al ser recogidas eran incoloras e inodoras, a excepción de un 10% que poseía materia en suspensión y en algunos casos desprendían olor a materia orgánica en descomposición, posiblemente se tratase de agua estancada.

Aptitud para el regadío

Para aproximar la idoneidad del agua para el riego, ha sido calculado el índice de adsorción de sodio (SAR) y la conductividad de cada muestra. Siendo posteriormente representados ambos valores en el diagrama publicado por U.S. Salinity Laboratory Staff en 1954 (Figura 6.23).

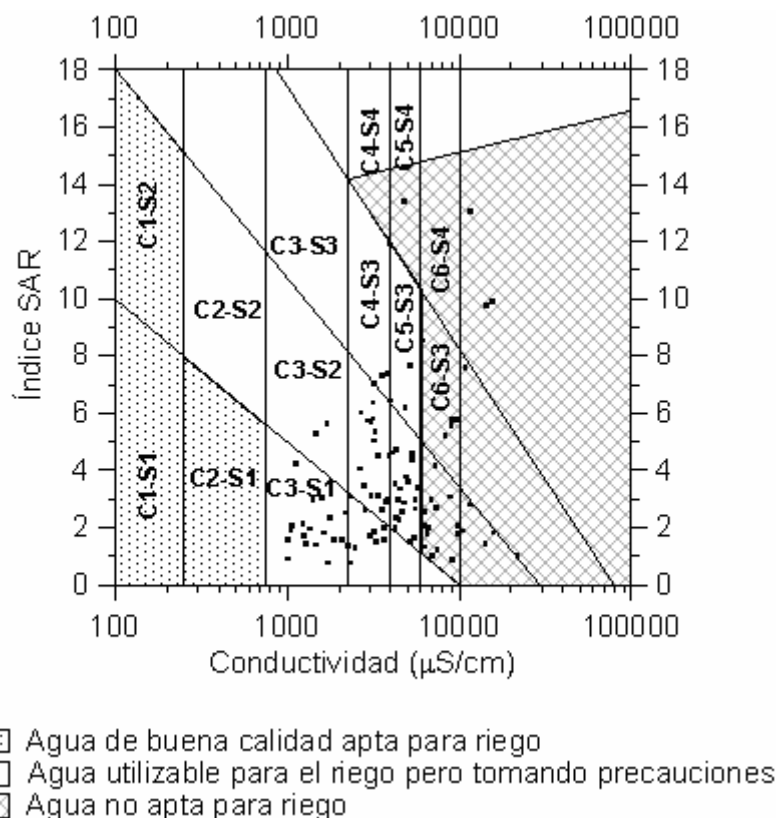


Figura 6.23. Representación de las diferentes muestras de aguas en el diagrama para la clasificación de las aguas para riego según el procedimiento de U.S. Salinity Laboratory Staff (1954) (Robles-Arenas et al., 2004b).

Como se observa en la Figura 6.23, un 75% de las muestras se sitúan en el grupo de aguas utilizables para riego pero con precauciones, referidas a problemas de salinización y alcalinización. Pero a la hora de considerar la aplicación de un agua a un determinado cultivo, no basta con considerar solo estos dos parámetros, en la decisión final se debe valorar: las características físico-químicas de la propia agua, tipo y condiciones del suelo, tipo y condiciones del cultivo, el tipo de riego y las consecuencias que puede suponer la aplicación de ese agua durante el periodo de tiempo previsto.

En la valoración de las características químicas del agua, se debe tener en cuenta otras concentraciones de elementos que puedan resultar tóxicos para los cultivos, como podrían ser el Cl, B, Fe, Mn, Pb, etc (FAO, 1985). Estos elementos hacen descartar las muestras procedentes de los pozos mineros más próximos a la zona de explotación de los cuerpos minerales, ya que son los que poseen las concentraciones más elevadas. Sólo el 16% de ellas podrían ser aplicadas a cultivos no sensibles a Cl y Na, el 56% y el 51% del total de muestras consideradas superan la concentración máxima recomendada por FAO (1985) para Mn (0,2 mg/L) y Zn (2,0 mg/L) respectivamente; así como un 13% la del Ni (0,2 mg/l).

6.4. EVOLUCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Se ha podido contrastar en varios puntos de agua los resultados obtenidos en la campaña de muestreo del año 1995 con la realizada en 2003 para esta tesis. El resultado se muestra en la Figura 6.24, donde se aprecia la existencia de un deterioro de la calidad de las aguas subterráneas donde es posible ver un incremento en la concentración del anión sulfato y de Zn.

Uno de los elementos que ha experimentado un incremento considerable son los sulfatos. El incremento de la concentración de sulfato se debe a que durante el proceso de explotación de la mina los niveles piezométricos se mantuvieron deprimidos, lo que facilitó la entrada del oxígeno atmosférico por las diferentes galerías, pozos mineros y fracturas provocando la oxidación de los minerales sulfurosos y la formación de costras de sulfatos en la superficie de los materiales rocosos. Al finalizar la explotación minera en el año 1991 se paran inmediatamente los bombeos y con ello empieza la recuperación o subida de los niveles piezométricos, los cuales se han recuperado aproximadamente 30 m. Durante la subida del nivel del agua se produce la disolución de las fases minerales de sulfato solubles y su incorporación a las aguas subterráneas, lo que ha dado lugar a la existencia de concentraciones muy elevadas de sulfato.

El proceso de lavado que desarrolla el agua subterránea sobre las paredes de las diferentes zonas mineralizadas también incorpora muchos metales, los cuales pueden estar en mayor o menor concentración en función del pH del agua subterránea y la existencia o no de un medio oxidante o reductor.

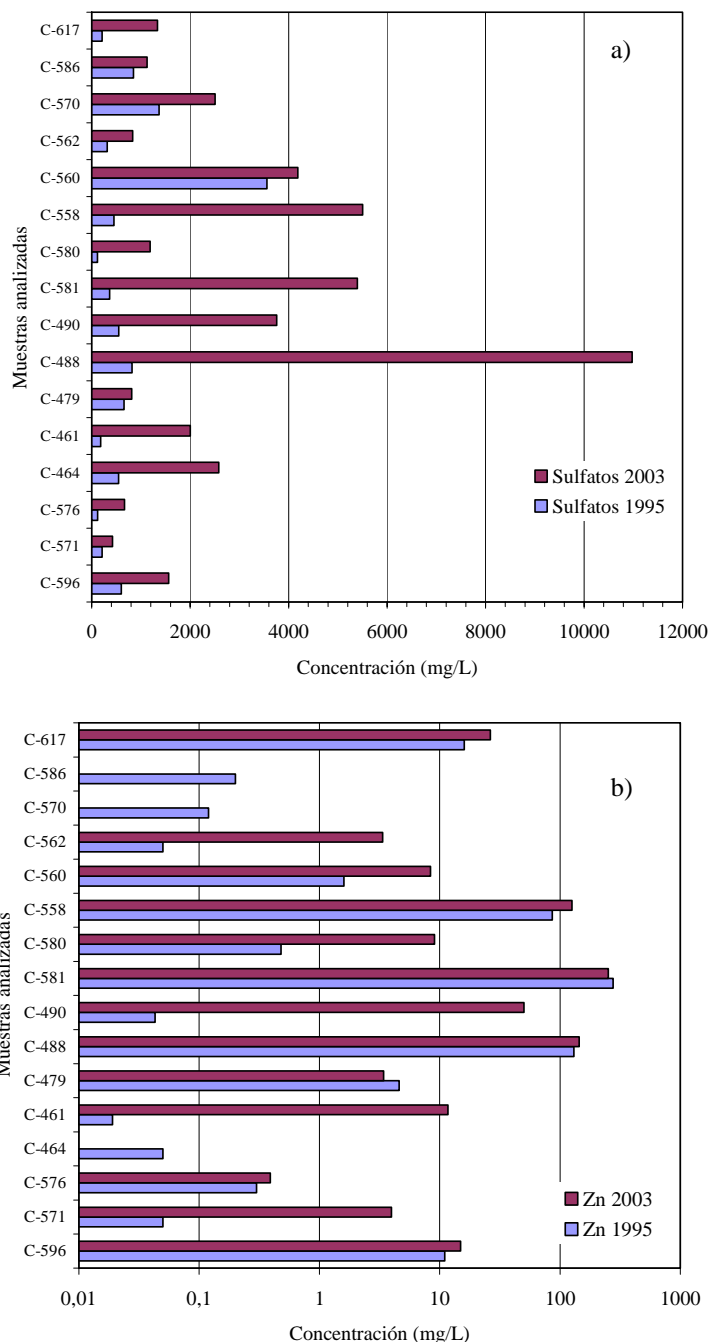


Figura 6.24. Concentración de diferentes elementos en las aguas subterráneas en dos campañas de muestreo en los mismos puntos de agua de la UHSM. a) Sulfatos y b) Zn.

6.5. DISCUSIÓN

Hidrogeológicamente, la zona estudiada (UHSM) es de una gran complejidad, al tratarse de un medio geológico muy fracturado, atravesado por decenas de kilómetros de galerías. Ello provoca que no sea fácil poder conocer la hidrodinámica del sistema, ya que hay que considerar el comportamiento de estas galerías, que actúan a modo de estanques, cediéndose agua de unos a otros cuando varían los niveles (a partir del año

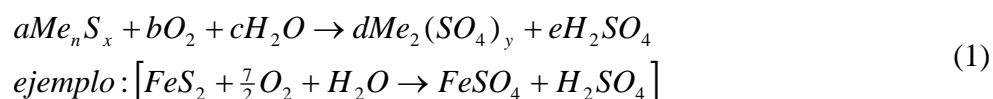
1991 se ha producido una subida del nivel freático en las cortas mineras de 30 m), con la consecuente mezcla de aguas.

En lo que respecta a los aspectos hidroquímicos, se puede establecer que el principal contaminante es la mineralización (diferentes tipos de sulfuros metálicos), presente en los niveles acuíferos intermedio y profundo, lo que provoca que, en las zonas de mayor concentración de galerías y fracturas se den las condiciones más favorables para que las aguas puedan contener concentraciones elevadas de metales pesados y sulfatos.

Respecto a su uso potencial, las aguas podrían ser utilizables en determinadas explotaciones agrícolas, especialmente a aquellos cultivos tolerantes a ciertas concentraciones de elementos químicos. Las muestras que se han considerado más favorables para consumo humano corresponden a los puntos más alejados de la zona de explotación minera, pero deberían ser analizados en ellas otros parámetros considerados por las normativas y no determinados en este trabajo.

La alta concentración de sales disueltas en las aguas subterráneas de la Sierra Minera, el amplio rango de pH y la concentración de metales se debe a la oxidación de los sulfuros presentes en los materiales geológicos y en los diferentes estériles, residuos minero-metalúrgicos y a la alta solubilidad de los productos de oxidación (diferentes tipos de minerales del grupo de los sulfatos) en el agua. Este proceso ha sido ampliamente estudiado (Fernández-Rubio, 1978 y García et al., 1986). La oxidación se desarrolla por dos agentes:

1) Proceso químico (*Me* es el metal y *S* representa el azufre).



2) Proceso biológico



La reactividad de las especies minerales, presentes en el área de estudio, ante la presencia de los agentes oxidantes químicos y biológicos es, de mayor a menor: Marcasita > Pirita > Calcopirita > Blenda > Galena (García et al., 1986). Para que el

proceso de oxidación de estos sulfuros se desarrolle, es necesario que estas especies se encuentren en contacto con el oxígeno presente en la atmósfera y agua, tal y como se observa en las reacciones (1) y (4). Estas condiciones están presentes en la Sierra Minera, pues la superficie de mineral, se pone en contacto con el aire y con las precipitaciones. El número de pozos mineros abiertos a la atmósfera es de 1902, con un diámetro superior a 1,5 m; existen 12 cortas mineras que ocupan un área de 2,4 km² y una profundidad variable entre 30 y 100 m; el volumen de residuos minero-metalúrgicos es de 175 millones de m³. Respecto a las galerías subterráneas de antiguas minas, se desconoce tanto el volumen como la longitud de las existentes.

Los procesos químicos y biológicos se producen simultáneamente o consecutivamente en función del pH, dentro de estos se pueden diferenciar tres etapas (García et al., 1998 y Rodríguez, 2002).

I) A pH casi neutro ambos procesos ocurren simultáneamente a similar velocidad. Esta situación se mantiene mientras no se supera la capacidad de neutralización de la acidez del medio. Siempre que el pH sea superior a 5, las reacciones de oxidación están prácticamente inhibidas (son muy limitadas).

II) Cuando el pH baja de 5, se debe esperar que se produzca, en un periodo de tiempo más o menos amplio, la oxidación de todas las especies de sulfuros existentes en el medio.

III) Para valores de pH próximos o inferiores a 2,5 tiene lugar una actividad bacteriana muy alta, acelerándose todos los procesos geoquímicos de acuerdo a las reacciones (2) y (4).

Estas tres fases pueden verse en la Figura 6.22, donde el rango de pH varía entre 2 y 7,8. En las cortas mineras y en un gran número de pozos mineros, es donde se han registrado los valores más críticos, siendo el pH muy cercano a 2. Debe quedar claro que, la velocidad y magnitud de todos los procesos anteriormente descritos, es función de la superficie específica (superficie volumétrica o efectiva) del grano mineral expuesto al ataque de los agentes oxidantes. Este proceso es mucho mayor en los estériles de flotación que en los de gravimetría, y en éstos aún mayores que en los de la cortas o vacíos.

En el caso concreto de la Sierra Minera de Cartagena, el problema del drenaje ácido de minas (DAM), de los depósitos de lodos de flotación, de gravimetría y estériles de mina, esta condicionado por las características climáticas de la región. El proceso de oxidación, de las diferentes especies de sulfuros, se desarrolla durante largos periodos de tiempo, sobre todo en la superficie del mineral. En la superficie de las balsas de lodos

de flotación, gravimetría y estériles de minas, se observan zonas con elevado grado de oxidación y costras de precipitación de sulfatos (Foto 6.8).

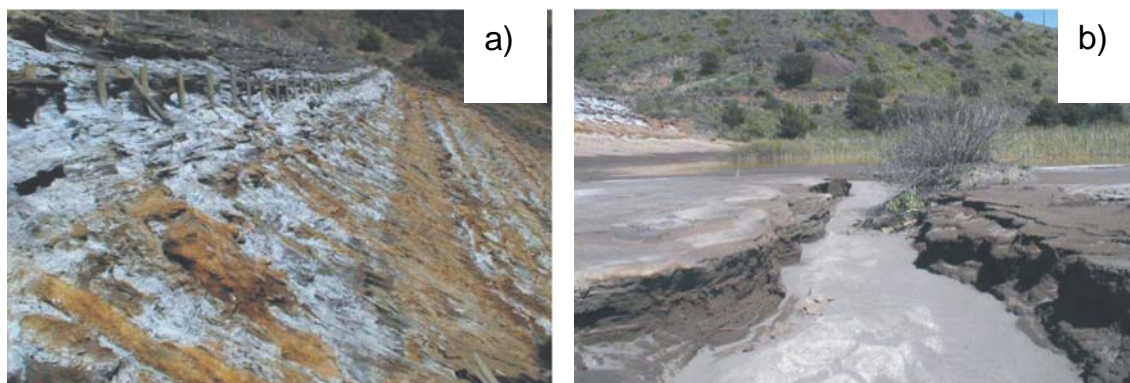


Foto 6.8. a) Costras de sulfatos con diferentes tonalidades en la superficie de las balsas de lodos. b) Erosión por el escurrimiento superficial de las aguas meteóricas. Se observa además la ausencia de muro de contención y de vegetación en la superficie y talud de la balsa.

En las cortas es posible observar diferentes grados de oxidación y formación de lagos antrópicos, como resultado de la recuperación de los niveles subterráneos que estaban deprimidos por bombeo, al ser interceptados por las explotaciones mineras (Foto 6.4).

Los minerales oxidados y los sulfatos solubles, existentes en la superficie de las balsas de lodos, depósitos de residuos y en las paredes rocosas de los pozos, canteras y galerías mineras, son lavados en un corto espacio de tiempo, durante las lluvias torrenciales que se producen en pocos eventos en primavera e invierno. El drenaje superficial de las aguas meteóricas, se caracteriza por presentar una alta concentración de sedimentos en suspensión, metales y sulfatos en disolución, con un pH generalmente ácido (Tabla 6.2). Hay que señalar que el proceso erosivo, que desarrollan las aguas meteóricas, está favorecido por la ausencia de diques de retención y cobertura vegetal, en la gran mayoría de los depósitos de lodos y estériles.

Si se consideran los diferentes parámetros fisicoquímicos medidos en este trabajo, se puede apreciar que existe una fuerte contaminación de las aguas superficiales y subterráneas con sulfatos y metales Pb, Cd, Fe, Mn (Figura 6.21 y 6.22). Esta concentración se puede explicar por la acción conjunta del agua, el oxígeno y las bacterias ferroxidans y sulfoxidans características en este tipo de mineralización (García et al., 1986).

La existencia de un pH alcalino, en más del 70% de las muestras, puede atribuirse a la presencia de los materiales calcáreos y los mármoles presentes en la zona. Las muestras que presentan pH inferiores a 5, indican que se ha superado la capacidad de neutralización del medio geológico natural. En el caso de las aguas acumuladas en las cortas Brunita y Los Blancos-II, donde el pH es inferior a 3, se ha llegado a la fase tres

descrita anteriormente, donde se aceleran los procesos de oxidación de todas las fases minerales de sulfuros presentes en los materiales geológicos.

Como se ha analizado con anterioridad en este Capítulo, entre los principales contaminantes se encuentran el sulfato y diferentes metales (Pb, Fe, Zn, Mn, B, Ni, Cd). En la Figura 6.25 se puede apreciar que existe una relación débil entre la concentración del ión sulfato y los metales presentes en el agua. Esta relación muestra que el proceso de oxidación de los sulfuros origina los sulfatos presentes en el agua y condiciona la presencia de mayor concentración de metales, aunque también interviene la litología de las rocas encajantes. Resultados similares se han comprobado en áreas afectadas por actividades mineras y en aquellos donde se produce la contaminación por residuos mineros, que la presencia de sulfato incrementa la solubilidad de los metales (Custodio 1983; Rodríguez y Candela, 2004).

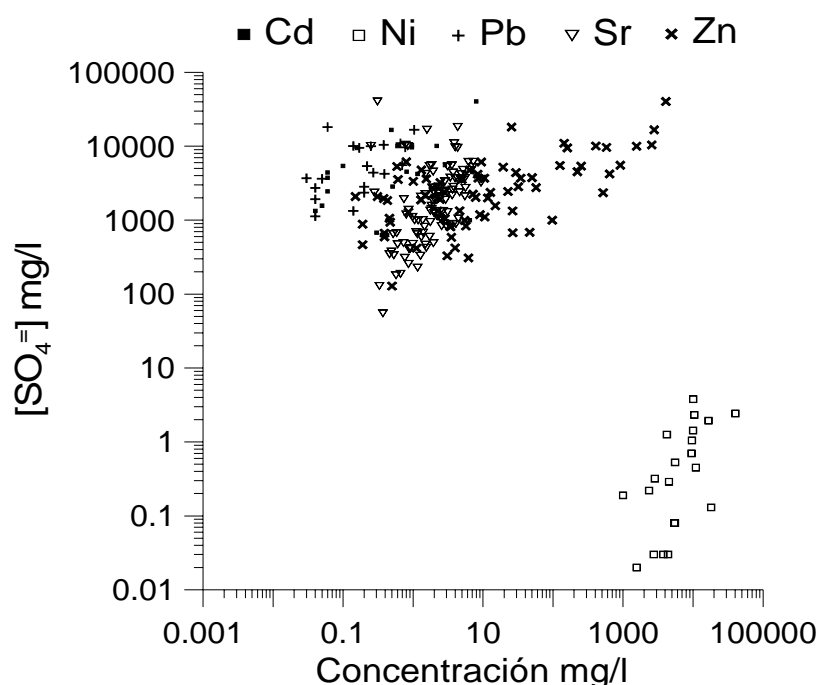


Figura 6.25. Relación de la concentración de sulfatos con respecto a la concentración de Cd, Ni, Pb, Sr y Zn.

Las zonas más afectadas por el drenaje ácido intermitente de la escorrentía superficial, son el Mar Menor y el Mediterráneo. En ambos se han determinado concentraciones de metales pesados (Pb, Zn, Cd) en los sedimentos, las aguas, plantas, microorganismos y animales acuáticos (De León et al., 1982; Martínez et al., 1993; IGME, 1996; Deheyn et al., 2000 y Sanchiz et al., 2000).

**CAPITULO 7. CARACTERIZACIÓN DEL
IMPACTO AMBIENTAL DE LAS ACTIVIDADES
MINERAS DE LA SIERRA DE CARTAGENA-LA
UNIÓN**

CAPITULO 7. CARACTERIZACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LAS ACTIVIDADES MINERAS DE LA SIERRA DE CARTAGENA-LA UNIÓN

El impacto ambiental, provocado por la persistencia espacio-temporal, de los residuos producidos por las actividades minero-metalúrgicas, en el devenir histórico de la Sierra de Cartagena-La Unión, ha dado lugar a marcados efectos ambientales negativos sobre el medio continental y marino. De los impactos definidos en el Capítulo 1, se pueden identificar los siguientes:

- a) Impacto sobre el suelo.
- b) Impacto sobre la flora y la fauna.
- c) Impacto sobre los recursos hídricos: aguas superficiales, subterráneas y marinas.
- d) Impacto sobre el paisaje.
- e) Impacto sobre atmósfera.

Para una mejor comprensión del mismo, en el presente Capítulo se analizan cada una de las fuentes que producen impacto ambiental, en base a los datos obtenidos durante la realización de este trabajo y a la información existente; siendo su objetivo la definición y delimitación de las áreas dotadas de una mayor problemática ambiental, en función del grado de contaminación que presentan y de las fuentes que lo originan.

7.1. IMPACTOS SOBRE EL MEDIO CONTINENTAL

7.1.1. IMPACTO SOBRE EL SUELO

Una superficie importante de la Sierra de Cartagena-La Unión (aprox. 50 km²) está dominada por áreas en las que los suelos naturales se han perdido, ya sea por haber sido extraídos en la apertura de cortas o huecos de explotación, eliminados en la apertura de pistas, cubiertos por el vertido de residuos mineros, o contaminados por el vertido de efluentes (Foto 7.1).

En la imagen de satélite (Foto 7.1), se observan, en tonalidades moradas, las zonas afectadas por la actividad minera, donde se encuentran las escombreras y balsas de residuos. Además, se aprecian las áreas afectadas por la acumulación de sedimentos, ricos en residuos mineros, en el cauce de la rambla del Beal, Ponce y Carrasquilla y la orilla del Mar Menor. Las tonalidades verdes son las zonas de vegetación, en las que se desarrollan los cultivos.

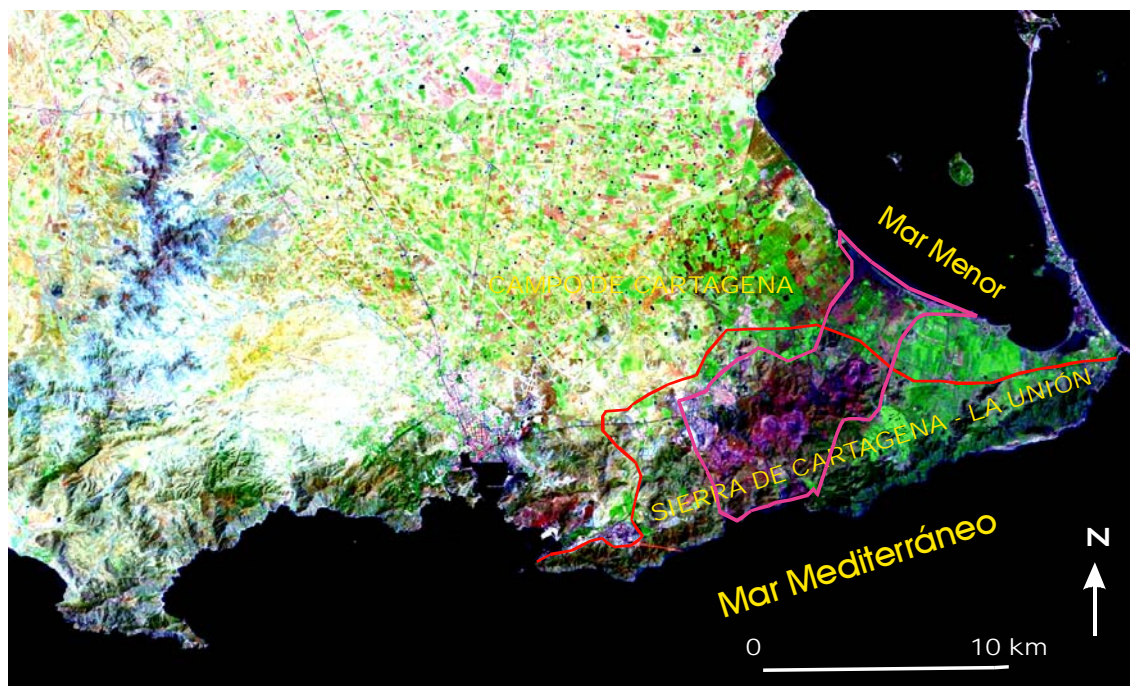


Foto 7.1. En la imagen del satélite Landsat resalta en color morado la superficie ocupada por la Sierra Minera y el área afectada por la deposición de sedimentos ricos en las ramblas del Beal, Ponce y Carrasquilla, en el Mar Menor y la del Gorguel en el Mediterráneo. El color verde corresponde a las zonas de cultivo.

Para el estudio de las características y propiedades físico-químicas de los suelos, se ha elegido un área comprendida entre las cuencas de las ramblas de Ponce y El Beal, por ser representativa del resto de la Sierra Minera (Figura 7.1). En ella, se han tomado 22 muestras superficiales (suelo o capa arable), siguiendo una malla aproximada de 500 m, con una profundidad comprendida entre 0 y 25 cm. También se realizaron tres sondeos de testigo (Figura 7.6), para estudiar las variaciones de la concentración de metales pesados con la profundidad (Rodríguez et al., 2002 a; Ramos, et al., 2004 a y b).

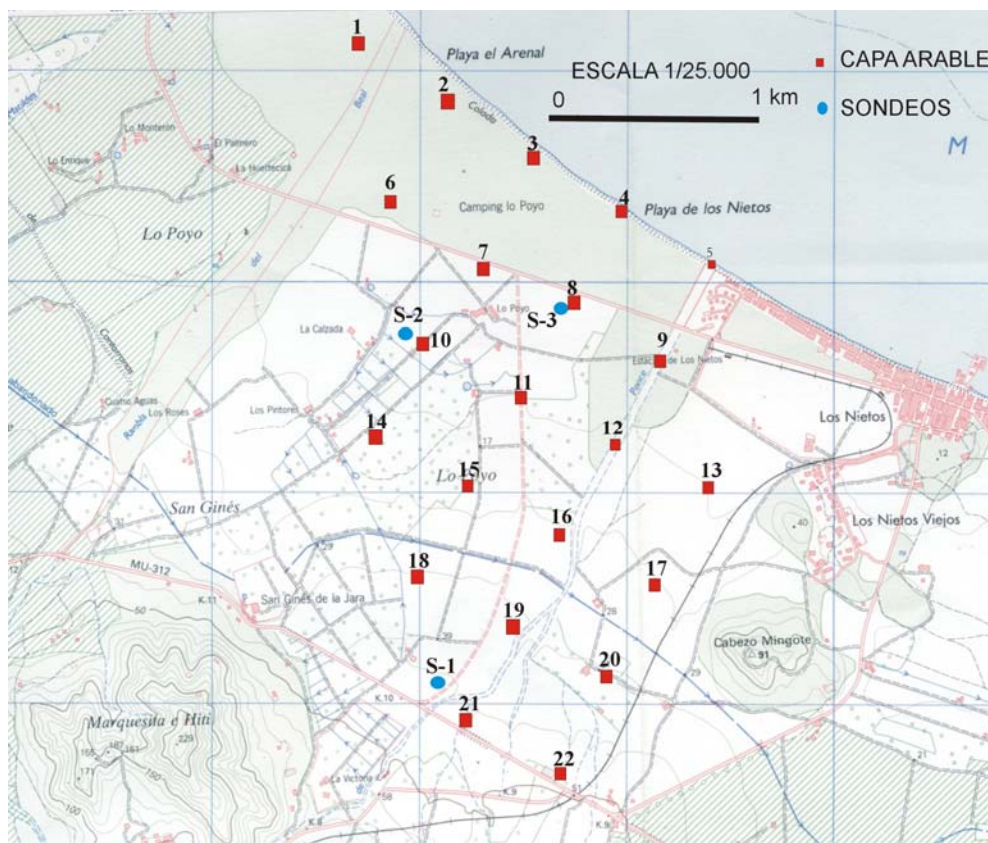


Figura 7.1. Situación de muestras de suelos (capa arable) y sondeos de testigo (Rodríguez et al, 2002a).

7.1.1.1. Muestras superficiales (capa arable)

De los resultados analíticos obtenidos en 22 muestras superficiales, se puede decir que los metales pesados mayoritarios son Zn y Pb, seguidos de Cu y Cd.

La concentración de Pb total presenta un valor promedio de 4016 ppm, con unos mínimos comprendidos entre 135 y 400 ppm en las muestras 13, 17, 20 y 22, situadas paralelamente a la rambla de Ponce, unos 500 m al este; y unos máximos superiores a 5000 ppm en 5 muestras, (1, 2, 6, 7) próximas a la desembocadura de la rambla del Beal en el Mar Menor, y la 19 muy próxima al cauce de la de Ponce (Figura 7.2 a). Al parecer, esta concentración se debe a que las áreas de ribera están afectadas por el aporte de sedimentos, procedentes de los residuos mineros, y aguas contaminadas que ocupan una importante área de inundación, debido a que el relieve en esta zona es muy llano y al carácter torrencial de las precipitaciones. También hay que señalar que la existencia de la carretera y la autovía actúan como muro de contención de la escorrentía superficial, aumentando el área de inundación de las ramblas.

En cuanto al Pb bioasimilable, el valor medio del total de las muestras es del 7,3% del Pb total. Las muestras 7, 10 y 12 superan los 1000 ppm de Pb bioasimilable cada una de ellas, suponiendo entre las tres el 52% del total asimilable y el 13% del Pb total. En seis

de las muestras se supera el 10% de Pb bioasimilable respecto al Pb total. En las muestras de la rambla del Beal (9, 16, 19 y 21), con altos contenidos en Pb total (12888 ppm), el Pb asimilable no llega al 20 % del contenido asimilable, o al 13% del total de muestras (Figura 7.2 a).

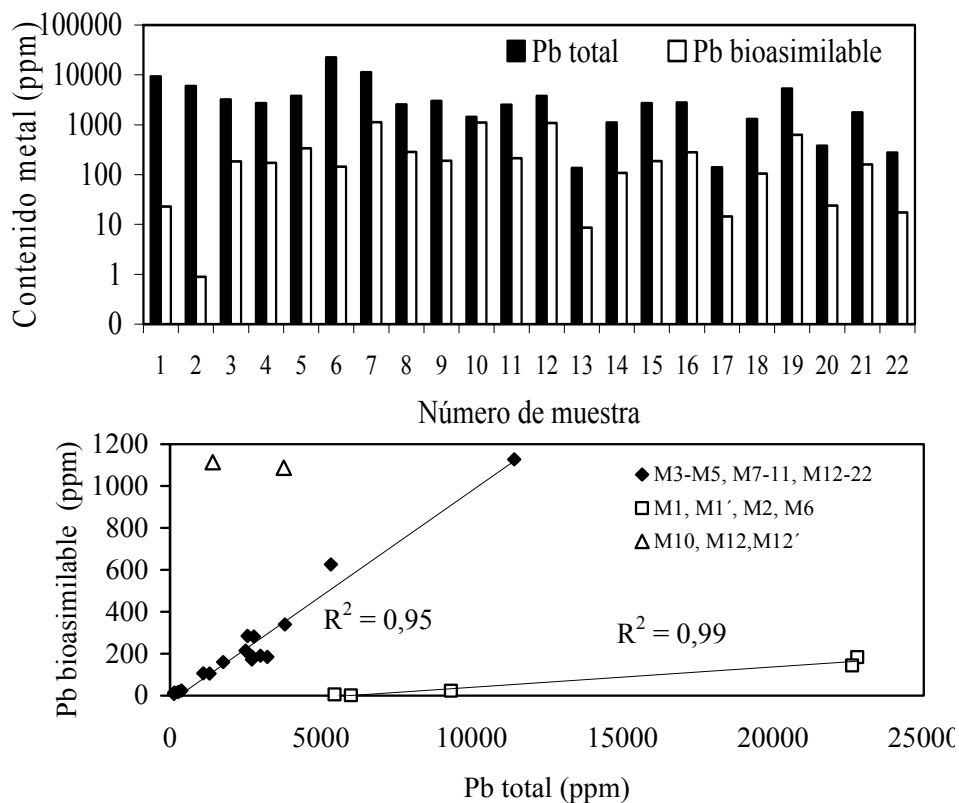


Figura 7.2. a) Concentraciones de Pb total y bioasimilable en muestras de capa arable, **b)** Pb total versus Pb bioasimilable. Muestras tomadas entre las ramblas Beal y Ponce.

Si se representa el Pb total versus el Pb bioasimilable, se pueden distinguir tres grupos de muestras (Figura 7.2b). Se observa que existe una buena correlación en dos de los grupos. La diferencia entre las muestras puede estar motivado por el tipo de vegetación que se desarrolla en cada una de ellas, pues el material superficial es muy similar en ambos casos, con una alta concentración de metal en superficie, en esta zona el pH es muy elevado, siempre mayor de 7.

Con la concentración de Zn total (Figura 7.3 a) sucede algo similar que con la de Pb, el valor promedio es de 4604 ppm, pero en las muestras 4, 13, 20 y 22, situadas en la cuenca de Ponce, su concentración es inferior a 1000 ppm, y son superiores a 5000 ppm en las muestras 1 y 6, que caen en la cuenca del Beal, y en las 9, 19 y 21, que están muy próximas a la rambla de Ponce. Se puede decir que el Pb y Zn van muy relacionados y que, salvo excepciones, sus concentraciones se incrementan y disminuyen a la vez (Figuras 7.2 a y 7.3 a). El total de las muestras de Zn bioasimilable representan solo el 2,7% del Zn total presente en las muestras. La muestra 2 se supera el 10% de Zn bioasimilable respecto al Zn total, y en 15 muestras no llegan al 2%.

En el caso del Zn, si se representa el Zn total versus el Zn bioasimilable, se puede observar la existencia de dos grupos de muestras en las que la M_1 , M_1' , M_2 y M_6 se agrupan como en el caso del Pb. Aquí no se aprecia una buena correlación como en el Pb.

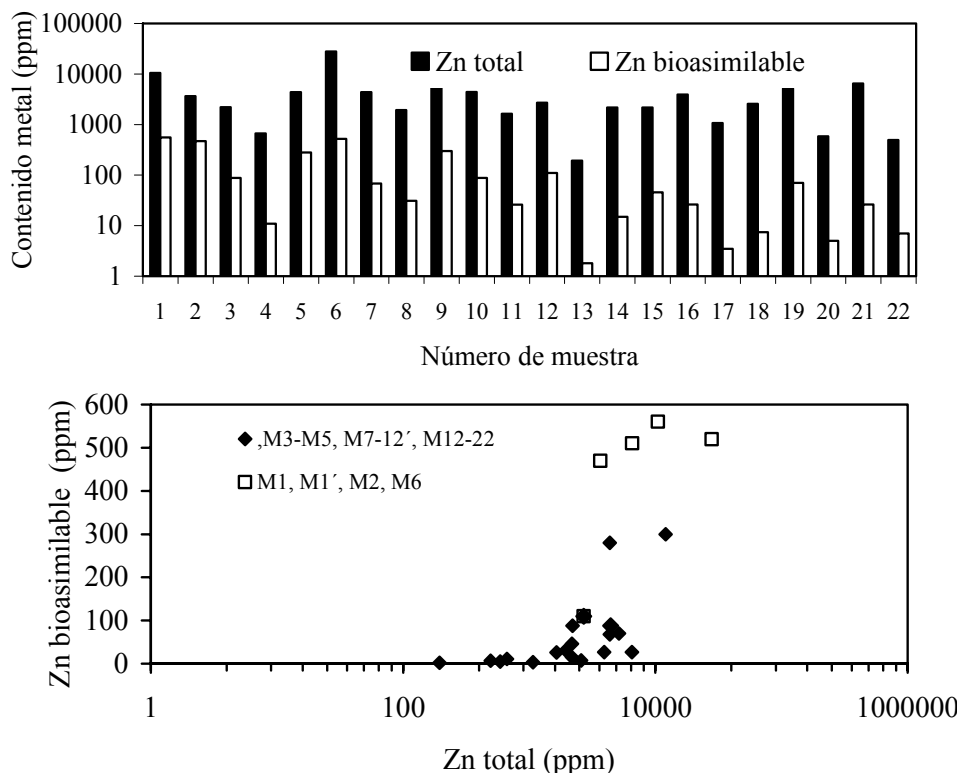


Figura 7.3. a) Concentraciones de Zn total y bioasimilable en muestras de capa arable, b) Zn total versus Zn bioasimilable. Muestras tomadas entre las ramblas Beal y Ponce.

La concentración de Cu total promedio es de 55 ppm, varía entre los 6,8 ppm de mínimo en la muestra 13 y los 176,5 ppm de valor máximo en la muestra 6 (Figura 7.4 a). Los contenidos de Cu asimilables son muy bajos, con un valor promedio del 2,2%; las muestras 7, 10 y 14 superan el 10% del total. En las muestras 13 y 14 la relación Cu bioasimilable respecto al Cu total tiene un ratio de 1:10 (Figura 7.4 a).

En el caso del Cu no se aprecia una clara correlación entre el Cu total y el bioasimilable, aunque se pueden formar dos grupos de muestras (Figura 7.4 b).

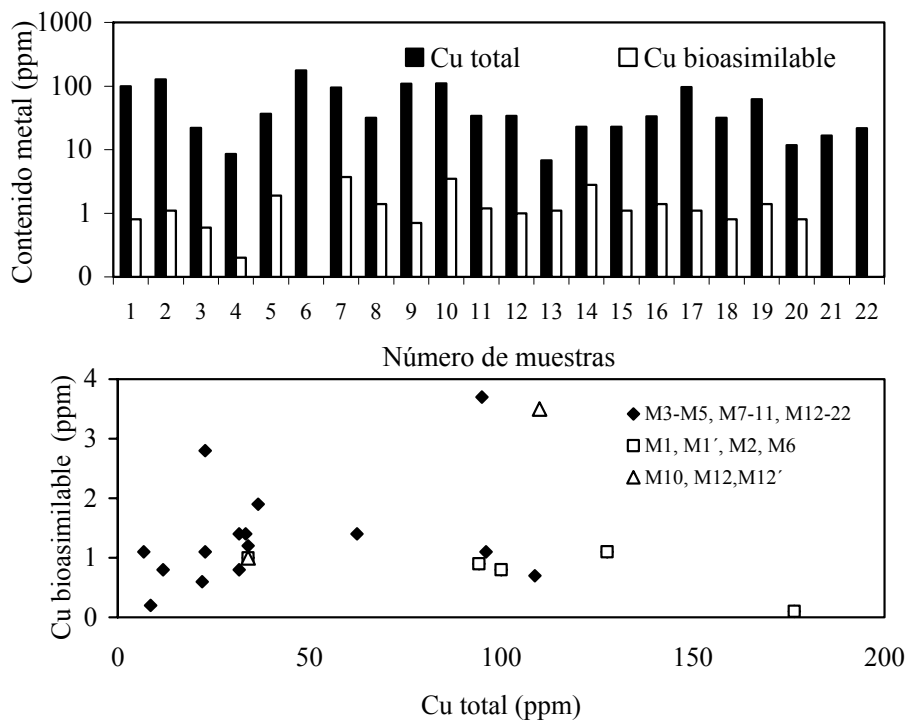


Figura 7.4. a) Concentraciones de Cu total y bioasimilable en muestras de capa arable, **b)** Cu total versus Cu bioasimilable. Muestras tomadas entre las ramblas Beal y Ponce.

Por último, el metal que se encuentra en menor cantidad es el Cd total (Figura 7.5 a), con un valor promedio de 4,4 ppm, superando los 10 ppm en las muestras 1, 6 y 9. Con el Cd bioasimilable sucede todo lo contrario que con los metales anteriores, pues aunque el valor promedio es de tan solo 2,1 ppm, el Cd asimilable representa el 48% del Cd total, llegando en la muestra 6 al 93%. Esto demuestra que este elemento presenta un gran riesgo ambiental, pues pequeñas concentraciones en el suelo pueden producir una concentración importante en las plantas, además, sus límites permisibles en la dieta alimenticia son muy bajos (2×10^{-4} mg/kg/día).

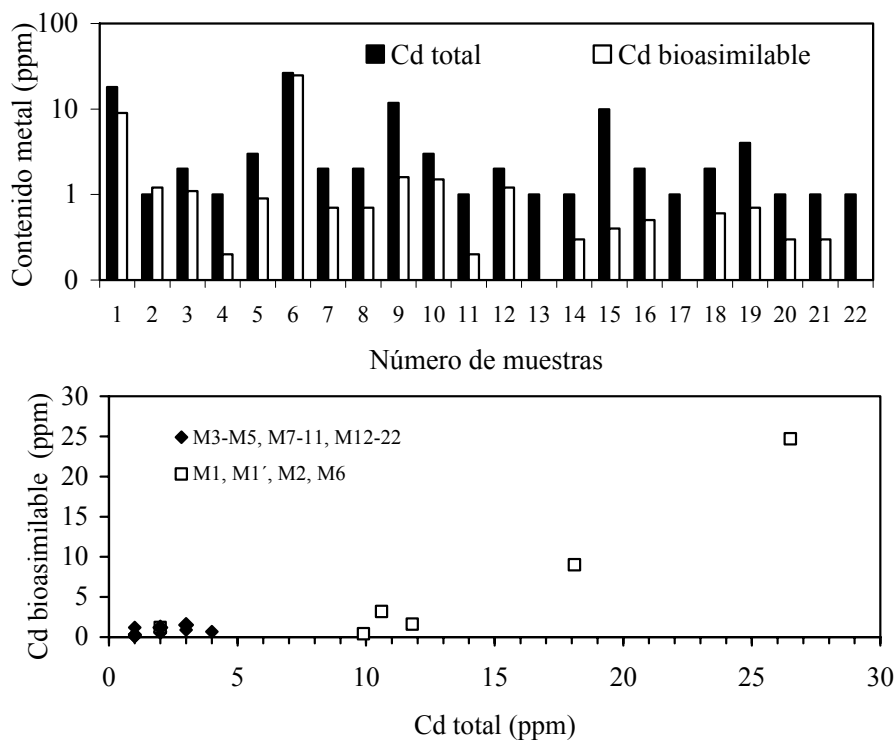


Figura 7.5. a) Concentraciones de Cd total y bioasimilable en muestras de capa arable, b) Cd total versus Cd bioasimilable. Muestras tomadas entre las ramblas Beal y Ponce.

7.1.1.2. Perfiles del suelo (sondeos con recuperación de testigo)

En la Figura 7.6 se han representado las litologías de los terrenos cortados por los tres sondeos mecánicos a testigo continuo realizados. En dicho sondeos aparecen en los tres primeros metros, unos limos rojizos, en donde se dan las mayores concentraciones de metales

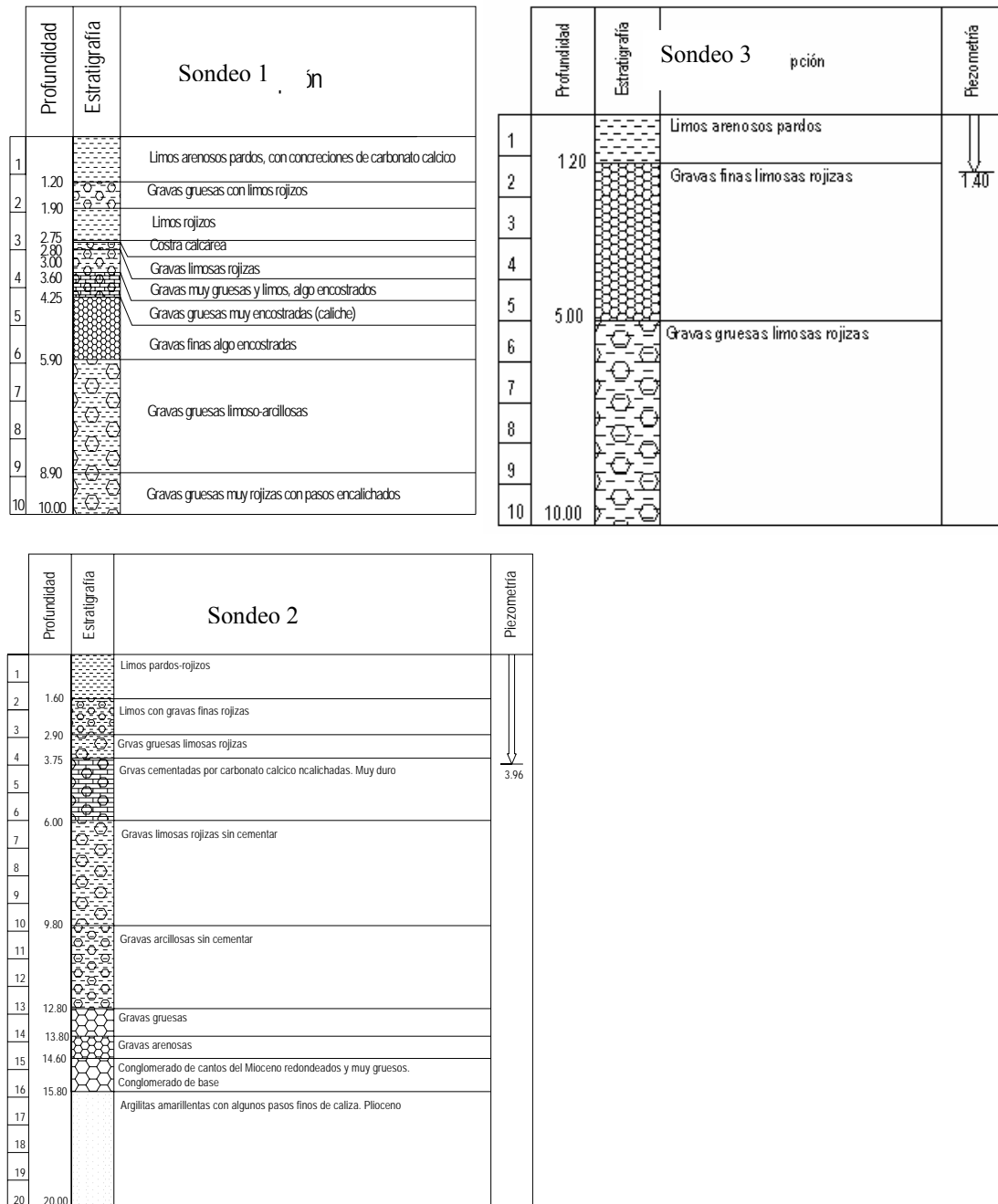


Figura 7.6. Sondeos realizados entre las ramblas de Ponce y Beal, para reconocer la concentración de metales en profundidad. m: metros, Lit: litología y NP: nivel piezométrico (Rodríguez et al., 2002a).

De los resultados analíticos obtenidos en las 15 muestras tomadas en los tres sondeos de testigo, se puede decir que los metales pesados mayoritarios son Pb, Zn, Cu y Cd, al igual que en las muestras superficiales.

En la Figura 7.7 se han representado las concentraciones de estos metales en función de la profundidad, y que se comenta a continuación.

La concentración de Pb total presenta un valor promedio en los 3 sondeos de 2874 ppm, con un valor máximo de 11611 ppm en el metro 0 (superficie) del sondeo 2 y un

mínimo de 278 ppm en el metro 18 del sondeo 2. El Pb bioasimilable de las muestras representan el 5,78% del Pb total, mostrando valores muy regulares en todas las muestras, alcanzando valores próximos al 10% en las muestras superficiales de los 3 sondeos, coincidiendo con las mayores concentraciones de metal, y mostrando similar comportamiento que en el resto de las muestras.

Con la concentración de Zn total sucede algo similar que con el Pb, ya que presenta un valor promedio de los 3 sondeos de 2305 ppm, repitiéndose en el metro 18 del sondeo 2 el valor mínimo (388 ppm). Los sondeos 1 y 3 presentan unos valores promedios entre 2070 y 1430 ppm, en tanto que el sondeo 2 presenta en superficie el valor más elevado de 3472 ppm. El conjunto de las muestras de Zn bioasimilable representan tan solo el 0,7% del Zn total, superando 3 muestras el 1% (Figura 7.7).

La concentración de Cu total promedio es de 48 ppm, varía entre los 5 ppm de mínimo en el metro 6 del sondeo 1 y un máximo de 173 ppm en la superficie del sondeo 2. Los contenidos bioasimilables de Cu son muy bajos, con un valor promedio del 3,57%; superando el 13% la muestra del metro 6 del sondeo 1 y la del metro 3 del sondeo 2 (Figura 7.7).

Por último, el metal que se encuentra en menor cantidad es el Cd total, con un valor promedio de 2,5 ppm, con un máximo de 12,9 ppm en el metro 3 del sondeo 2. El Cd bioasimilable tiene un valor promedio de todas las muestras de 5,94%, superando 7 muestras el 10% (Figura 7.7).

Esta elevada concentración de metales en la parte superior del suelo, está relacionada con el impacto ambiental producido por la minería. La mayor concentración de metales del sondeo 2 (Figuras 7.1 y 7.6) se encuentra en la zona de inundación de la rambla del Beal, aunque todas las muestras se encuentran en áreas que han sido, en determinado periodo de tiempo, zona de inundación de las ramblas afectadas.

El hecho de que todo el espesor del cuaternario en la zona (unos 17 metros) esté mineralizado, parece indicar que, aparte de la influencia de la actividad minera del último siglo, ha habido contaminación natural por erosión y lixiviación de minerales en los yacimientos aflorantes en la Sierra Minera. Para demostrar la edad de los sedimentos sería necesario realizar ensayos con datación isotópica para cuantificar en función del tiempo geológico la magnitud del aporte de sedimentos en esta zona, principalmente en las áreas de inundación y el Mar Menor.

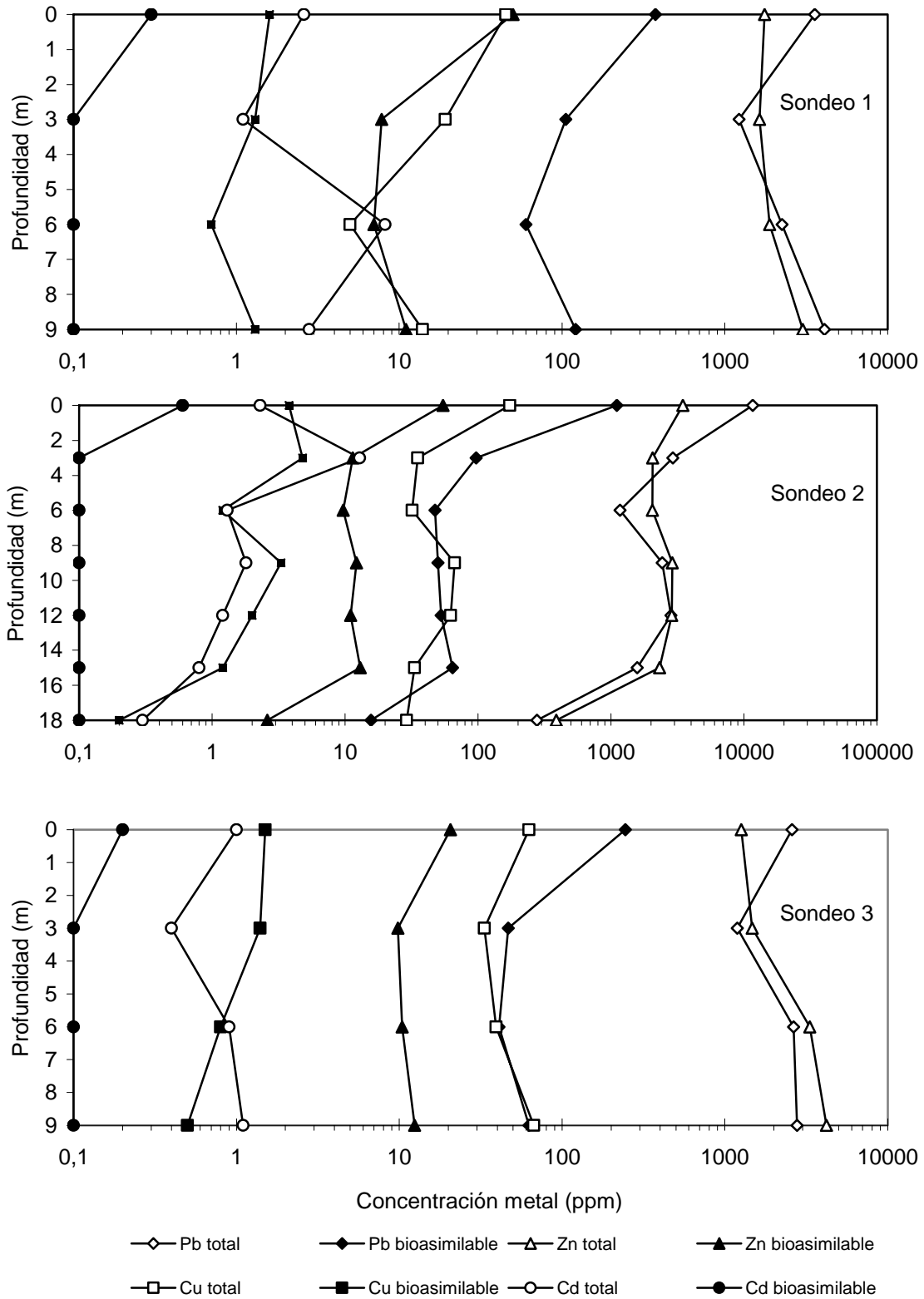


Figura 7.7. Evolución de las concentraciones (ppm) de Pb, Zn, Cu y Cd total y bioasimilable en 3 sondeos con recuperación de testigo. Ramblas Ponce y Beal.

En la Figura 7.8 se han representado los metales totales versus bioasimilables de los tres sondeos. Se puede apreciar que existe una correlación aceptable entre el Pb total y el bioasimilable, como sucede en las muestras superficiales. En el resto de los metales esto no se observa claramente.

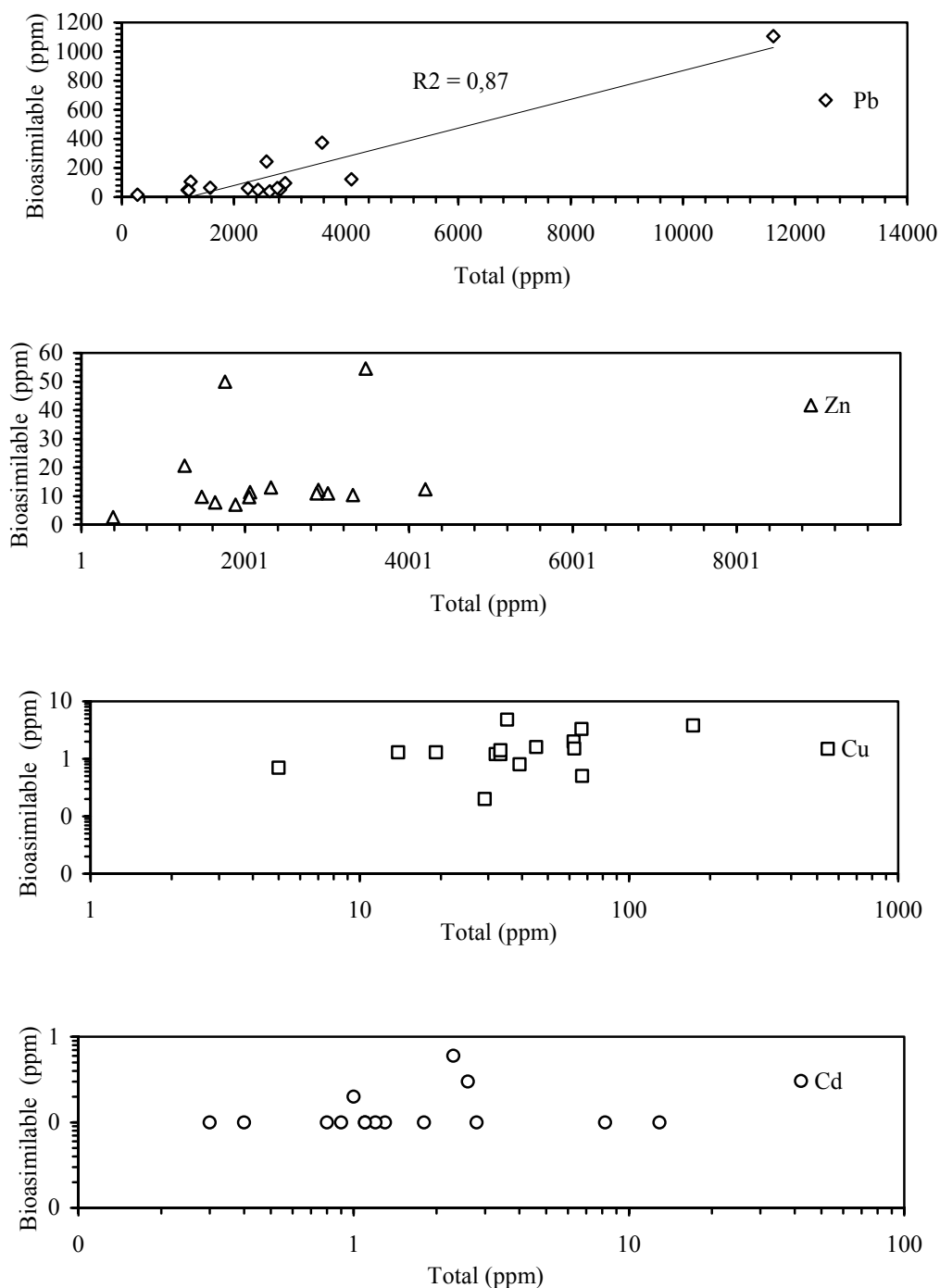


Figura 7.8. Concentraciones de metales totales versus bioasimilables de tres sondeos, situados entre las ramblas del Beal y Ponce.

7.1.1.3. Sedimentos depositados en el cauce de las ramblas

En la rambla del Beal se han tomado 12 muestras de sedimento (Figura 7.9), en las que se han realizado determinaciones de los elementos Pb, Fe, S, Al y Zn, además del pH y conductividad eléctrica, con el fin de conocer las concentraciones de estos metales (Tabla 7.1). Además, se han medido las granulometrías para ver su relación con los diferentes tipos de residuos existentes en la cuenca del Beal.

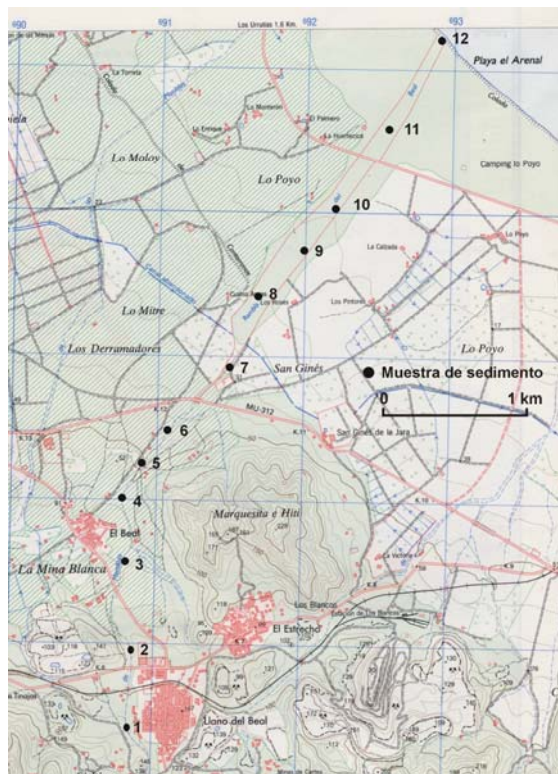


Figura 7.9. Situación de puntos de muestreo de sedimentos en la rambla del Beal.

Tabla 7.1. Concentración de metales totales (ppm), pH y C.E. en muestras de sedimentos de la rambla del Beal. Valores medios de 5 muestras. (García et al., 2003).

Muestra	Distancia a línea de costa (km.)	Pb	Zn	Fe	S	Al	pH	CE
1	5,5	85100	100	342700	51100	49000	2,77	5,09
2	5,0	21900	300	304000	19000	63300	3,5	3,22
3	4,5	45000	200	258000	27200	58100	3,58	3,55
4	4,0	31000	1700	259300	24100	44200	3,42	3,15
5	3,5	44003	10100	231400	36200	42200	4,31	7,01
6	3,0	39100	5100	211300	41700	47300	3,72	8,80
7	2,5	49000	300	250800	27800	47200	5,34	2,89
8	2,0	46400	100	243100	33900	38700	3,82	6,73
9	1,5	38800	7200	208400	27000	57100	6,3	3,01
10	1,0	23300	300	235200	29300	46000	4,83	10,1
11	0,5	19100	100	221300	12100	45200	4,63	11,9
12	0,0	29400	200	252400	800	44400	4,21	22,8

¹Valores límite

50-300 150-450

¹ Valores límite de concentración (ppm) de metales pesados en suelos en España.

Los valores de conductividad eléctrica se incrementan en la medida que se acercan a la costa, lo que es indicativo de la presencia de sales que se disuelven en agua (Tabla 7.1). En el caso del pH, los valores disminuyen debido a la existencia de sales solubles en el cauce de la rambla, así como diferentes minerales que neutralizan la acidez. Estas sales suelen ser fluorescencias o precipitados de diferentes tipos de sulfatos.

El comportamiento del Pb es muy uniforme, observándose solo en una muestra de cabecera un mayor valor. En esta zona es donde se encuentran las mayores acumulaciones de residuos en el cauce de la rambla. Las altas leyes de Pb, que oscilan entre el 2 y 8%, son completamente anómalas, llegando incluso a ser mucho más altas que las existentes en los yacimientos minerales de la Sierra Minera. La explicación más plausible es que la acción hidrodinámica de las ramblas provoca una concentración gravimétrica de los minerales plumbíferos en relación con otros minerales más ligeros y más solubles, que son transportados en suspensión hasta el Mar Menor. Tal es el caso del Zn, que aparece como carbonatos, de menor densidad que los sulfuros de Pb.

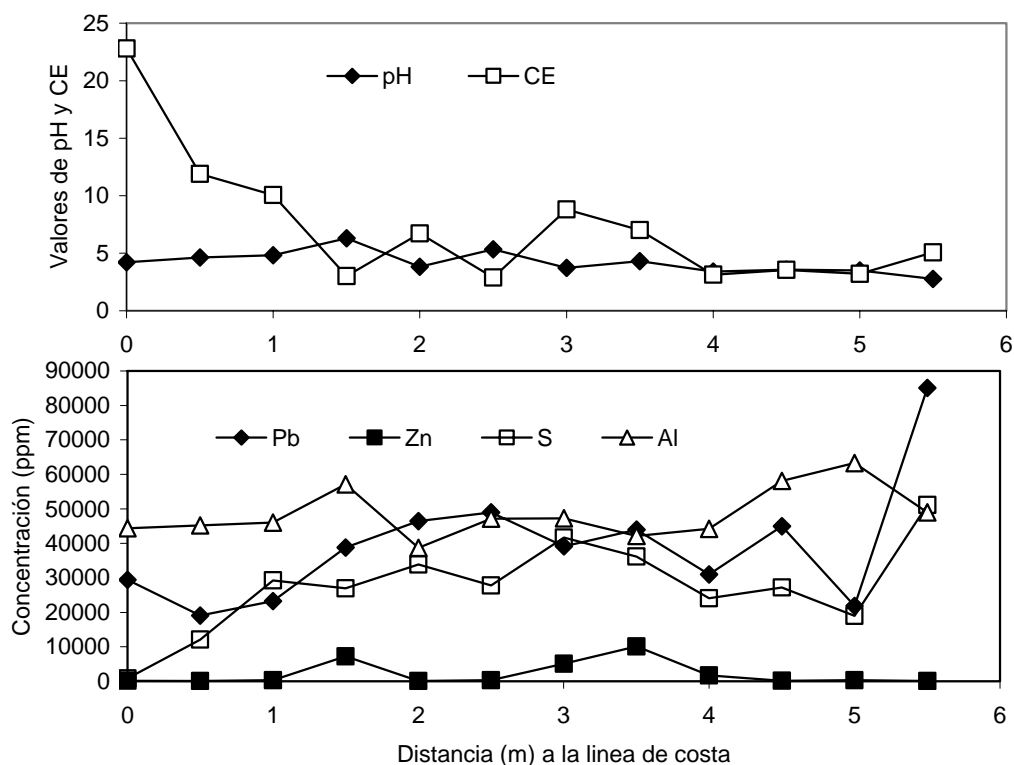


Figura 7.10. Perfil longitudinal de concentración de metales, pH y CE, en los sedimentos de la rambla del Beal (Elaborada con datos de la Tabla 7.1).

En el caso del Zn, que constituye uno de los elementos más abundantes en el medio geológico, en los residuos se aprecia un comportamiento irregular, con concentraciones inferiores al 1% del peso total de la muestra de sedimento (Figura 7.10). Esto puede ser el resultado de que la movilidad geoquímica en condiciones de pH ácido es muy alta, y la posibilidad de precipitación es nula, por lo que es transportado por el agua de

escorrentía hacia el Mar Menor, quedando en ellos el Zn asociado a las estructuras de los minerales.

En el caso del azufre, se nota una disminución en las proximidades de la costa. En el resto de elementos que se muestran en la Tabla 7.1 y Figura 7.10, no se aprecian diferencias significativas.

7.1.2. IMPACTO SOBRE LA VEGETACIÓN

El área de suelo afectada directamente por la actividad minera ocupa aproximadamente unos 50 km². En ella el suelo, la flora y la fauna original han sido afectadas en mayor o menor grado. Además de estas zonas directas se encuentran otras afectadas por el vertido de lodos en las ramblas. En los cauces de ribera el impacto ambiental ha sido muy grande y en ellas se detectaron concentraciones elevadas de metales pesados en el suelo y en los residuos que se encuentran en el cauce. Todo este impacto ambiental se ve incrementado por las características climáticas del área de estudio.

Se ha analizado el contenido de plomo total en suelo y en plantas, y se ha determinado el valor del pH y de la conductividad eléctrica, en 6 especies de plantas autóctonas. Los valores que se presentan son la media de 5 muestras de cada especie vegetal (Tabla 7.2 y Foto 7.2).

En la Figura 7.11 se ha determinado una correlación superior a 0,6 entre el Pb total en suelo y en plantas, independientemente del tipo de especie. Esto es un indicativo de que existe una relación entre el contenido de plomo total y el bioasimilable, como el observado en las muestras de suelo (Figuras 7.2b y 7.8)

Tabla 7.2. Concentración de Pb total en suelo y en plantas autóctonas (ppm). Rambla del Beal. Número de muestras: 5 (Hernández et al., 2004).

Especies	Nombre común	Punto de Muestreo ¹	Pb en suelo (total)	Pb en plantas	pH	C.E.
<i>Paronychia suffitica</i>	Sanguinaria mayor	3	43000±2140	949,04±58,02	3,93±0,18	4,00±0,25
<i>Brassica fruticulosa</i>	Col silvestre	6	37200±2234	946,26±36,22	5,66±0,33	4,00±0,25
<i>Sporobolus pungens</i>	Hierba de Judea	7	48100±1997	1333,16±66,31	4,93±0,25	4,20±0,22
<i>Piptatherum miliaceum</i>	Triguera	8	46000±2448	556,50±28,41	4,38±0,18	9,77±0,55
<i>Lygeum spartum</i>	Albardín	11	18800±855	202,96±15,87	6,00±0,31	3,50±0,16
<i>Arthtocnemum macrostachyum</i>	Almajo	12	27500±1047	79,86±8,12	6,47±0,26	18,61±1,03

¹ Las muestras de las plantas se han cogido en las proximidades de los mismos puntos de la Figura 7.9, fuera del cauce de la rambla.

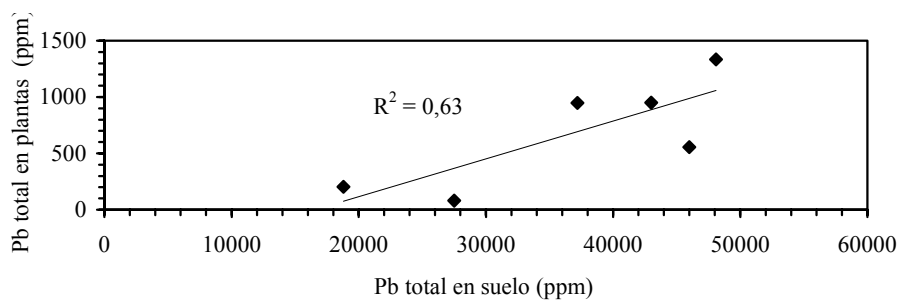


Figura 7.11. Concentraciones de Pb total en suelo versus Pb total en 6 plantas de la rambla del Beal (Elaborada con datos de la Tabla 7.2).

Se puede apreciar que la concentración de Pb en el suelo es muy elevada, con valores entre 1,9 y 4,8% en peso. El contenido en plantas es muy variable, entre 79 y 1333 ppm. Los mayores valores se encuentran en las plantas tomadas en las cercanías del cauce de la rambla.



Brassica fruticulosa (col silvestre)



Arthrocnemum macrostachyum
(almajo)



Piptatherum miliaceum (triguera)



Lygeum spartum (albardín)



Sporobolus pungens (hierba de Judea)

Foto 7.2. Imágenes de las plantas analizadas de la rambla del Beal.

7.1.3. IMPACTO SOBRE LA FAUNA TERRESTRE

Son escasos los estudios realizados sobre el impacto que ejercen los residuos sobre la fauna terrestre. Se destaca el estudio toxicológico realizado en dos ejemplares de águilas perdiceras (Foto 7.3 Foto tomada de: www.internatura), localizadas en el parque natural de la Peña del Águila (Sierra de Cartagena-La Unión), para la determinación de metales pesados (Ambiental, S.L., 1997). Los metales determinados fueron plomo y cadmio (Tabla 7.3), que junto con el mercurio son considerados los más significativos desde el punto de vista toxicológico y de contaminación en aves (Scheuhammer, 1987 en Ambiental, S.L., 1997). El interés de su estudio radica en que estas rapaces suponen el último eslabón de la cadena trófica, por lo que los niveles de contaminantes en sangre son reflejo de su dieta alimenticia; compuesta fundamentalmente por conejos, liebres y otros roedores, que a su vez se nutren de las especies vegetales presentes en la Sierra Minera. Las concentraciones de Pb y Cd en la sangre son un indicador que pone de manifiesto el potencial riesgo ambiental de los depósitos de residuos sobre la fauna, pues la concentración de Pb se encuentra en el límite de exposición subletal (Tabla 7.3).

Tabla 7.3. Resultados de las determinaciones de metales pesados en 2 ejemplares de águila perdicera (Ambiental, S.L., 1997).

Metales analizados	Pb (mg/dl)	Cd (mg/dl)
Resultados	15-21	0,01-0,17
Valor exposición subletal	20	No
Efectos	Sobre la reproducción	Evidencia exposición continuada en el tiempo



Foto 7.3. Águila perdicera.

7.1.4. IMPACTO SOBRE LAS MASAS DE AGUAS CONTINENTALES

7.1.4.1. Impacto sobre las aguas superficiales

Los cursos de aguas superficiales han constituido, en el tiempo de explotación minera, el lugar de vertido de los lodos de flotación hasta el año 1956, momento en el que el Excmo. Ayuntamiento de Cartagena decide imponer, a todas las empresas propietarias

de lavaderos de mineral, medidas para lograr la decantación de los sólidos en suspensión, permitiendo únicamente el vertido a las ramblas de aguas libres de materiales sólidos (Vilar et al., 1991), lo que dio lugar a la implantación de balsas para la acumulación de lodos (ver Capítulo 4). Es de señalar que las aguas de vertidos se caracterizan por un pH ácido y gran concentración de sales y metales en disolución.

Sin embargo la construcción de estas balsas, ubicadas en las cuencas hidrográficas (en muchos casos en los cauces de éstas) de las ramblas cuyas aguas tributan al Mar Mediterráneo y Mar Menor, cegaron las cabeceras de ramblas y barrancos (Figura 7.12). Todo esto ha desencadenado un marcado impacto ambiental sobre la hidrodinámica de las aguas superficiales, acentuado durante los episodios de lluvias torrenciales por el aporte de sedimentos a los cauces y riberas de estos, y el de sedimentos en suspensión y contaminantes en disolución al medio marino.

De este modo, la fuerte intensidad de la precipitación, que caracteriza a los aguaceros propios de un clima árido/semiárido, unida a la ausencia de una cobertura vegetal, a lo abrupto de su fisiografía y a las propiedades físicas de los materiales que conforman cada depósito de residuos, ha dado y da origen a unas elevadas tasas de erosión que tiene como respuesta un aumento exponencial de la carga de fondo y del caudal de sólidos en suspensión. Todo ello ocasiona un incremento potencial de los daños asociados a fenómenos hidrológicos extremos, en las áreas subsidiarias de las diferentes cuencas que integran la Sierra Minera. Así acontece con los depósitos de residuos mineros presentes en las cuencas de las ramblas que tributan al Mar Menor (Carrasquilla, Ponce, Beal (Figura 7.12), Matildes y Miedo) y al Mar Mediterráneo (Portman y Gorguel).

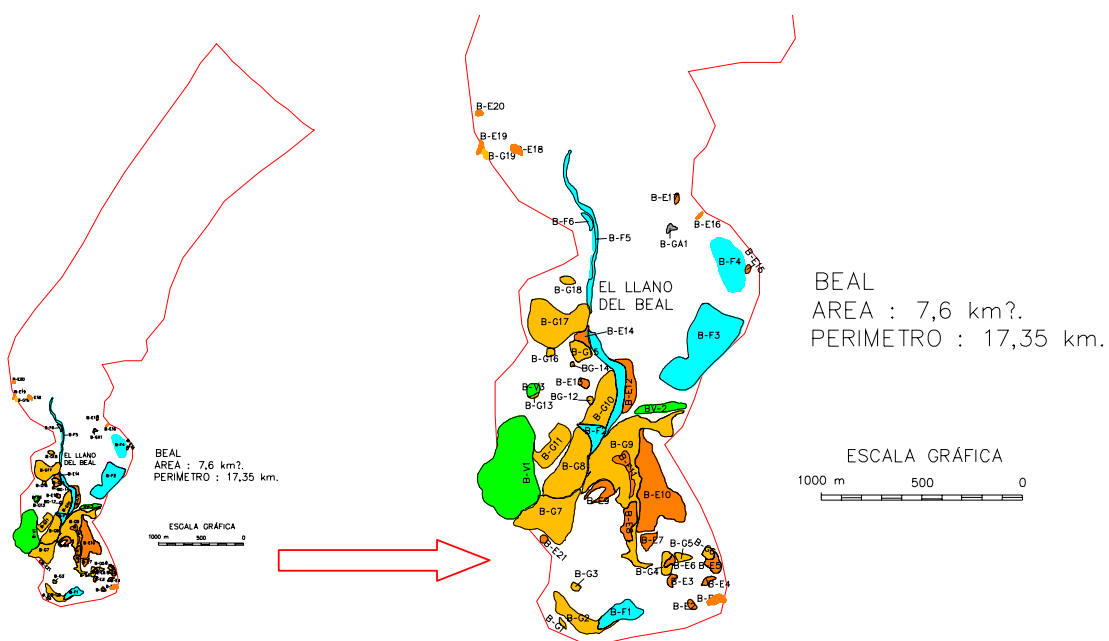


Figura 7.12. Cartografía de los residuos minero-metalúrgicos de la rambla del Beal. Sección del mapa original a escala 1:25.000.

Además, el problema se ve agravado también desde el punto de vista químico, debido a los procesos de transferencia de contaminantes metálicos (por disolución de las sales solubles) a las aguas de escorrentía (ver Capítulo 6).

Para la corrección de este impacto, la Confederación Hidrográfica del Segura, en el año 1995, llevó a cabo obras de encauzamiento (Fotos 7.4 y 7.5) y corrección hidrológica de algunas cuencas hidrográficas afectadas por la presencia de estos residuos, con el doble objetivo de laminar posibles avenidas y disminuir el aporte de sólidos al cauce, la ribera y al medio marino. Actualmente lo están haciendo en la rambla del Beal (septiembre 2004). Sin embargo, estas medidas no se han aplicado en todas las ramblas; no se realiza un mantenimiento adecuado, ni siguen criterios de ordenación y gestión del territorio. (ver Capítulo 9).



Foto 7.4. Obras de encauzamiento en la rambla de Portman.



Foto 7.5. Detalle de los gaviones de la rambla de Portman.

En la actualidad es posible observar la acumulación de residuos minero-metalúrgicos en todas las ramblas de la Sierra Minera. Especialmente en la del Gorguel (Fotos 7.6 y 7.7), en la vertiente del Mediterráneo y la del Beal en la del Mar Menor, es donde se aprecian las mayores acumulaciones de residuos en sus cauces y cabecera (Figura 7.12)



Foto 7.6. Lodos de flotación aterrizados, en el curso medio de la rambla del Gorguel.



Foto 7.7. Lodos de flotación en la desembocadura de la rambla del Gorguel.

7.1.4.2. Impacto sobre las aguas subterráneas

Las aguas subterráneas son uno de los medios más afectados por los residuos minero-metalúrgicos. En el Capítulo 6 se realiza un análisis detallado de las características hidrogeológicas del área de estudio y del grado de contaminación de las aguas de los diferentes materiales acuíferos, y su relación con los residuos mineros, cortas, pozos y galerías de mina. Las áreas del acuífero más afectadas por la contaminación son las zonas de las cortas Brunita, Tomasa y Los Blancos (ver Capítulo 4, Figura 4.19 y Capítulo 6).

7.2. IMPACTO SOBRE EL MEDIO MARINO

El medio marino y los ecosistemas existentes en la Sierra Minera representan un gran valor ambiental (ver Capítulo 2). Sin embargo, estos han sido afectados por los residuos minero-metalúrgicos directa e indirectamente. En el caso del Mar Menor, el impacto ambiental es indirecto, pero constante a lo largo del tiempo. En el caso del Mar Mediterráneo, el impacto ha tenido tres etapas: indirecto hasta el año 1957; directo desde 1957 al 1991, y posteriormente (al finalizar las actividades mineras) de nuevo indirecto ya que ha seguido recibiendo, a través de las ramblas, el aporte de aguas ácidas y sedimentos contaminados.

7.2.1. IMPACTO SOBRE LA LAGUNA DEL MAR MENOR

El Mar Menor tiene un gran valor medioambiental. En él se han declarado cinco lugares de importancia comunitaria (LIC), cuatro de especial protección para las aves (ZEPAS), y constituye una zona de especial protección para el Mediterráneo (ZEPIM). Además, hay tres zonas que forman parte de la Red de Espacios Naturales Protegidos (RENPN). En él destacan las praderas de *posidonia oceanica oceanica* (considera como el pulmón del Mediterráneo) y otras especies de especial singularidad (CAAM, 2002).

El Mar Menor (Figura 7.13) es un lago costero, cuya configuración actual se originó a finales del Plioceno (hace unos 2 millones de años) según Rodríguez Estrella y Lillo Carpio, (1992).

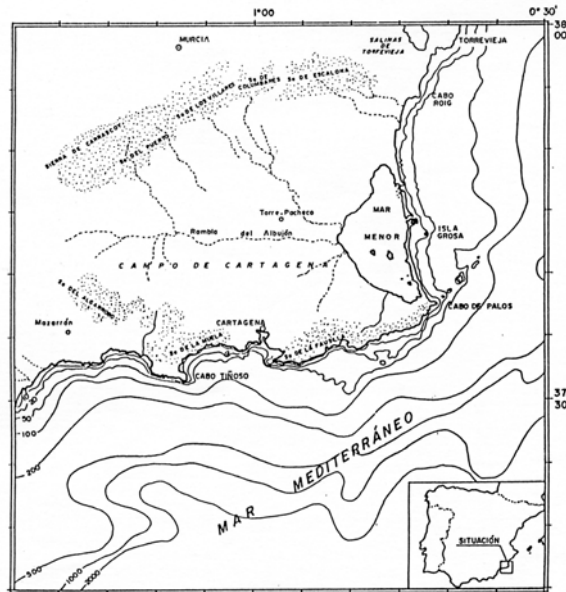


Figura 7.13. Mapa de situación del Mar Menor (Díaz del Río, 1993).

Se encuentra en el extremo oriental de las cordilleras Béticas, en la llanura prelitoral de la cuenca de sedimentación conocida como Campo de Cartagena, situada en la parte SE de la provincia de Murcia. Tiene forma triangular, cuyos lados tienen aproximadamente 13*15*21 km. Esta morfología geométrica viene condicionada por la existencia de fallas (Rodríguez Estrella, 1992). Ocupa una superficie aproximada de 133 km² (Díaz del Río, 1993) y embalsa un volumen de agua de unos 580 Mm³ (Arévalo, 1988). La profundidad máxima se aproxima a los 7 m en el Sur, y la media estimada de 4,36 m (Figura 7.14).

Dentro del lagoon emergen unos afloramientos volcánicos neógenos, constituidos por rocas calcoalcalinas (andesitas); la de mayor extensión es la isla Mayor o del Barón, de 0,89 km² y 104 m s.n.m. de altitud, dista 4,5 km de la costa (Los Nietos) y 5 km al Mar Mediterráneo; le sigue en extensión la isla Perdiguera, de 0,25 km² y 45 m de altitud, que dista 3 km de Los Urrutias. Además, hay otras tres islas de menor extensión denominadas Redonda, Ciervo y Sujeto.

El Mar Menor está separado del Mar Mediterráneo por una barra arenosa de unos 20 Km. de longitud, de dirección N170E, conocida como La Manga del Mar Menor, a través de la cual tiene comunicación por medio de cinco discontinuidades, conocidas como encañizadas o golas, que de norte a sur son: Ventorrillo, Torre y Charco, Estacio y Marchamalo, las dos primeras de origen natural y las otras tres antrópico (Figura 7.14). Además recibe el aporte, en periodos de lluvia, de aguas continentales procedentes de la escorrentía superficial que se desarrolla a través de las ramblas que descienden de la Sierra de Cartagena-La Unión y de las que proceden de las sierras que circundan al Campo de Cartagena (Figura 7.13).

La temperatura del agua oscila, según estaciones, entre 28° y 15° (varía de 24° a 29° en la costa en el mes de Septiembre (Rodríguez Estrella, 2000). Su salinidad varía entre 43,70 g/l y 44,65 g/l (Díaz del Río, 1993); pero ésta ha ido descendiendo con el tiempo siendo de un máximo de 40,6 g/l en Septiembre de 1998 (Rodríguez Estrella, 2000). En este descenso ha influido la apertura de las golas artificiales, el aporte del retorno de aguas de riego y la subida del nivel piezométrico en el acuífero cuaternario del Campo de Cartagena que ha incrementado el aporte de agua y nutrientes al Mar Menor.

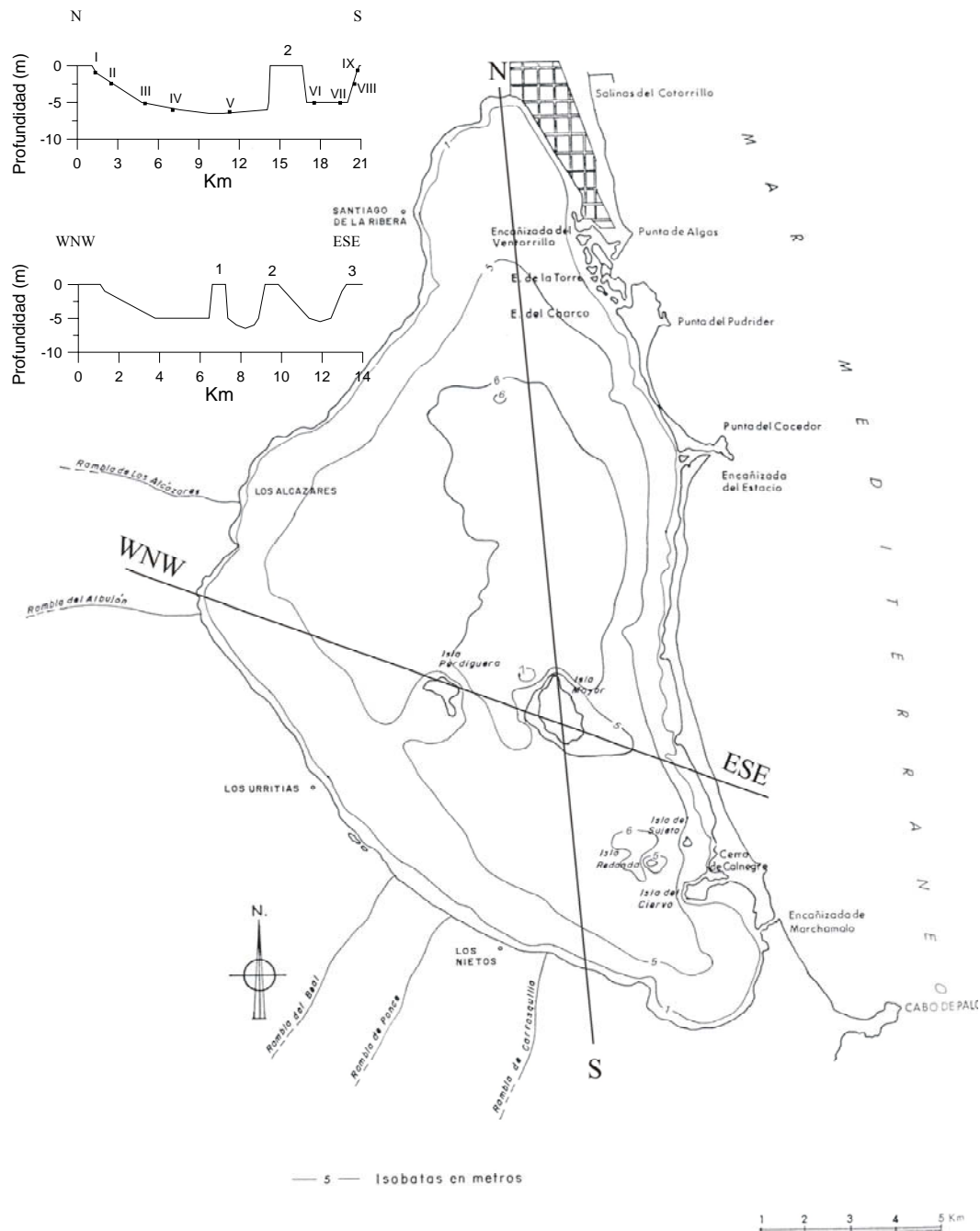


Figura 7.14. Mapa batimétrico de la laguna del Mar Menor (ITGE, 1990) y perfiles (del autor) donde se puede ver la variación de la profundidad en dos direcciones. 1: Isla Perdiguera; 2: Isla mayor; 3: La Manga del mar Menor.

La tranquilidad de sus aguas está afectada por la dirección e intensidad del viento (Figura 7.15), que presenta dos direcciones bien marcadas NE (levante) y SO (leveche). En las épocas de viento fuerte, es posible observar el agua del Mar Menor muy turbia.

La entrada de agua del Mar Mediterráneo, a través de las cinco golas (Figura 7.16a), da lugar al desarrollo de corrientes en el interior del lagoon (Figura 7.16b). Estas corrientes favorecen la distribución de los sedimentos dentro de la laguna.

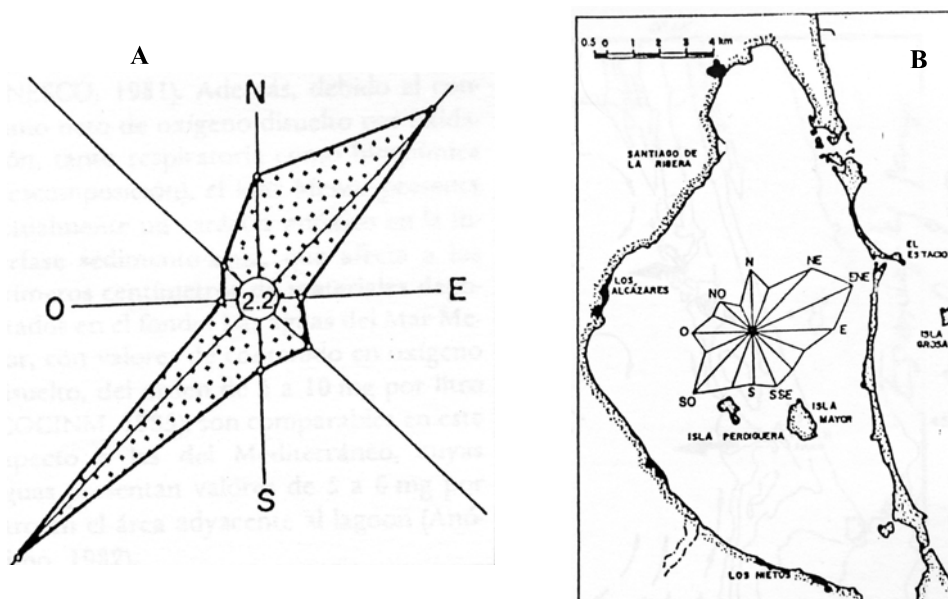


Figura 7.15. **A)** Frecuencias anuales de las direcciones de los vientos (Castillo de Galeras-Cartagena). El nº del centro indica el porcentaje de calma (Capel, 1986). **B)** Distribución de los vientos, según los datos anuales tomados del aeródromo de la Academia General del Aire de San Javier (Murcia) (Díaz del Río, 1993).

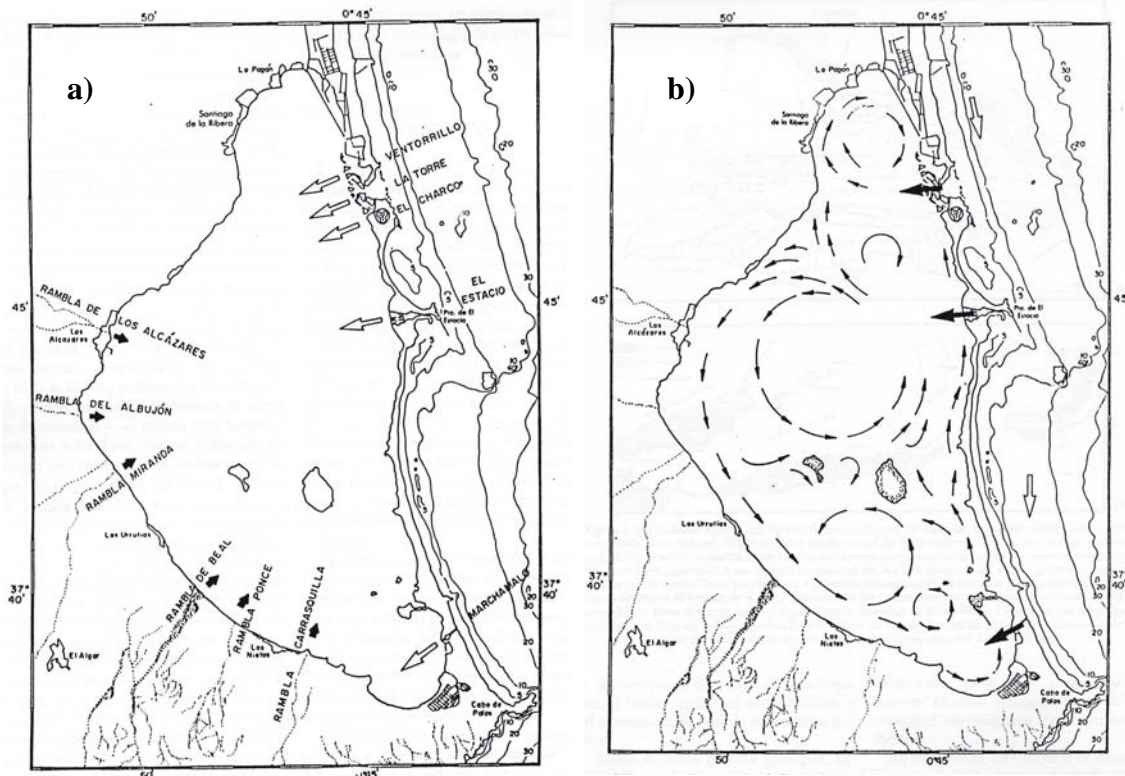


Figura 7.16. a) Entrada de agua al sistema lagoon costero procedente de los aportes continentales y marinos. b) Comportamiento teórico de la circulación de las aguas en el interior del Mar Menor (Díaz del Río, 1993).

7.2.1.1. Disposición de sedimentos y distribución de metales en el fondo marino

El Mar Menor recibe el aporte de sedimentos arrancados y transportados por la escorrentía superficial a través de las ramblas que en él desembocan. Estos sedimentos son mayoritariamente finos (limos y arcillas), debido a que, aunque la escorrentía torrencial con su gran viscosidad, puede arrastrar tamaños gruesos, el volumen o caudal de las ramblas es relativamente pequeño y, aguas abajo de las cuencas hay una pérdida de energía, debido a que el terreno en la zona de la desembocadura es muy llano, produciendo un ensanchamiento del cauce y además, la carretera y autovía actúan como barrera de la escorrentía superficial; por lo que preferentemente llegan al Mar Menor las partículas finas que se mantienen en suspensión. En el área del Mar Menor, situada al norte de la Sierra Minera (ramblas: Carrasquilla, Ponce, Beal, Matildes y Miedo), el principal aporte de partículas finas proceden de las balsas de lodos de flotación (ver Capítulo 5).

Se puede apreciar que los sedimentos finos (limos y arcillas) se encuentran en la zona central (Figura 7.17), mientras que en la zona costera se sitúan los sedimentos más gruesos: arenas y en menor medida gravas.

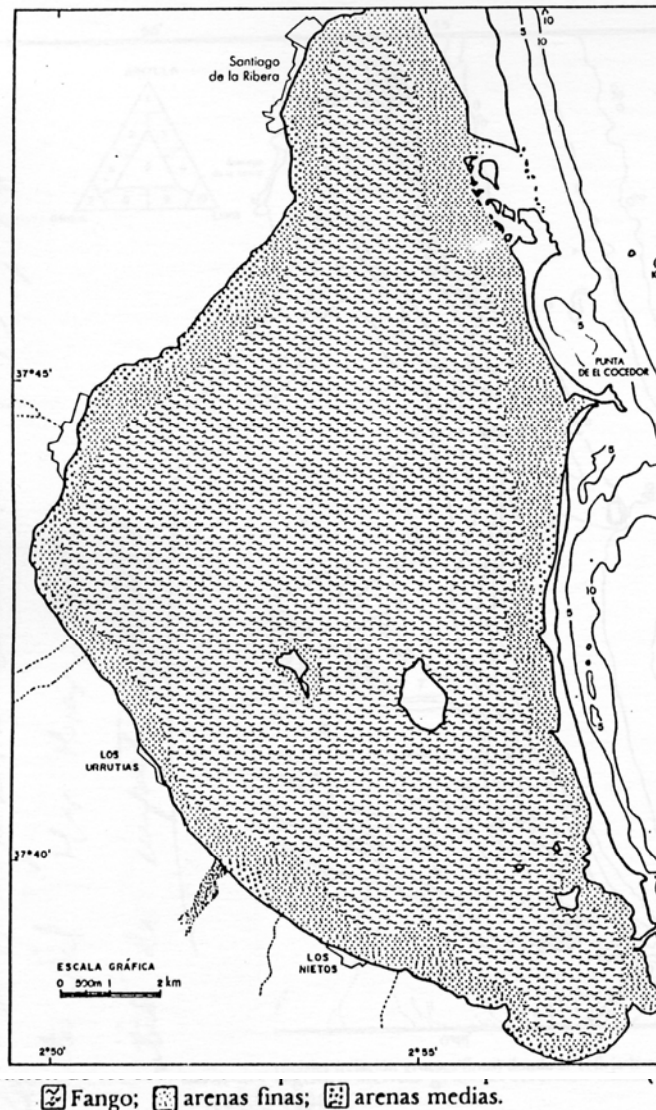


Figura 7.17. Distribución de los sedimentos superficiales (Simonneau, 1973).

En la Figura 7.18 se puede apreciar la distribución de los diferentes tipos de sedimentos de acuerdo a su clase textural en el Mar Menor (Díaz del Río, 1993). Se observa una disminución de las gravas del borde exterior del lagoon y de las islas existentes hacia el centro del lagoon. Las fracciones finas tienden a concentrarse mayoritariamente en el Sur y Centro, siendo estas dos zonas las más profundas del Mar Menor (Figura 7.14). Estas concentraciones están motivadas por el aporte de sedimentos de las ramblas Carrasquilla, Ponce, Beal, Miedo, Miranda y Albujón. El hecho de que la mayor acumulación se encuentre en el Sur se debe a que las corrientes marinas (Figura 7.16) transportan los sedimentos finos en suspensión hacia las dos zonas principales de acumulación en el Centro y el Sur. El que en el centro de la laguna se produzcan importantes acumulaciones de sedimentos, se debe al efecto barrera que producen las islas existentes en la misma y a la profundidad de estas zonas (Figuras 7.14 y 7.16).

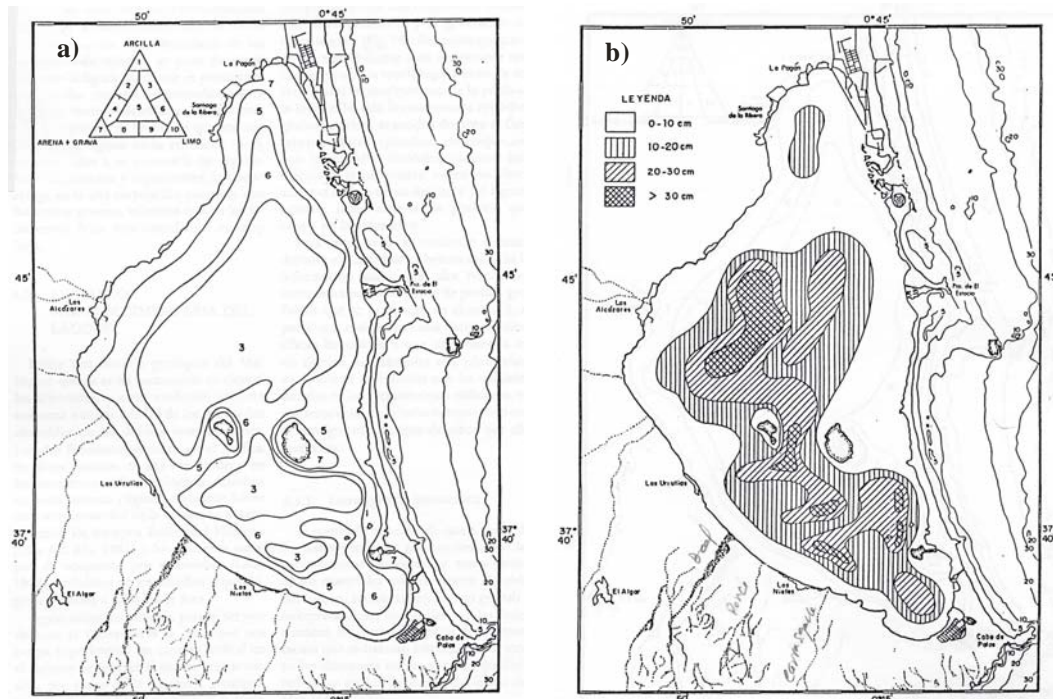


Figura 7.18. a) Textura de los sedimentos superficiales (relación gruesos-finos) donde se refleja la existencia de sedimentos arcillosos en el sector central del lagoon, siendo granocrecientes hacia sus bordes. b) Isopacas de la unidad deposicional “fango negro” (Díaz del Río, 1993).

El volumen de sedimento, existente en el lagoon, tiene dos orígenes fundamentales. En primer lugar el aporte de sedimentos de la Sierra Minera, tanto por el vertido directo a las ramblas de los estériles generados (hasta el año 1950), como por la erosión de los depósitos donde se acumularon posteriormente y, en segundo lugar, los que proceden de sedimentos y materia orgánica de las zonas agrícolas de cultivo intensivo, muy desarrolladas en las ultimas tres décadas, debido a la llegada del trasvase Tajo-Segura y la aplicación de riego en el Campo de Cartagena (Figura 7.1) (Rodríguez Estrella, 1995).

En la Figura 7.19a se han representado las curvas granulométricas de los sedimentos del Mar Menor y en la 7.19b los de los diferentes residuos identificados en la Sierra Minera. Se puede ver que, los residuos que más se parecen a los sedimentos del Mar Menor son los derivados de los procesos mineralúrgicos de flotación y de gravimetría. Esto se debe a que son éstos los que tienen granulometría más fina, y se caracterizan por presentar una baja cohesión y permeabilidad muy baja (menor de 10^{-6} m/s), lo que dificulta la percolación del agua y facilita la erosión. A esto hay que añadir que la mayoría de las balsas no se encuentran cubiertas por vegetación y presentan, en muchos casos, una pendiente muy variable, desde pequeñas inclinaciones en la superficie, hasta 30-45 e incluso 60% en el talud, que facilita la erosión por acción de las aguas meteóricas y el desarrollo de las cárcavas (Foto 7.8).

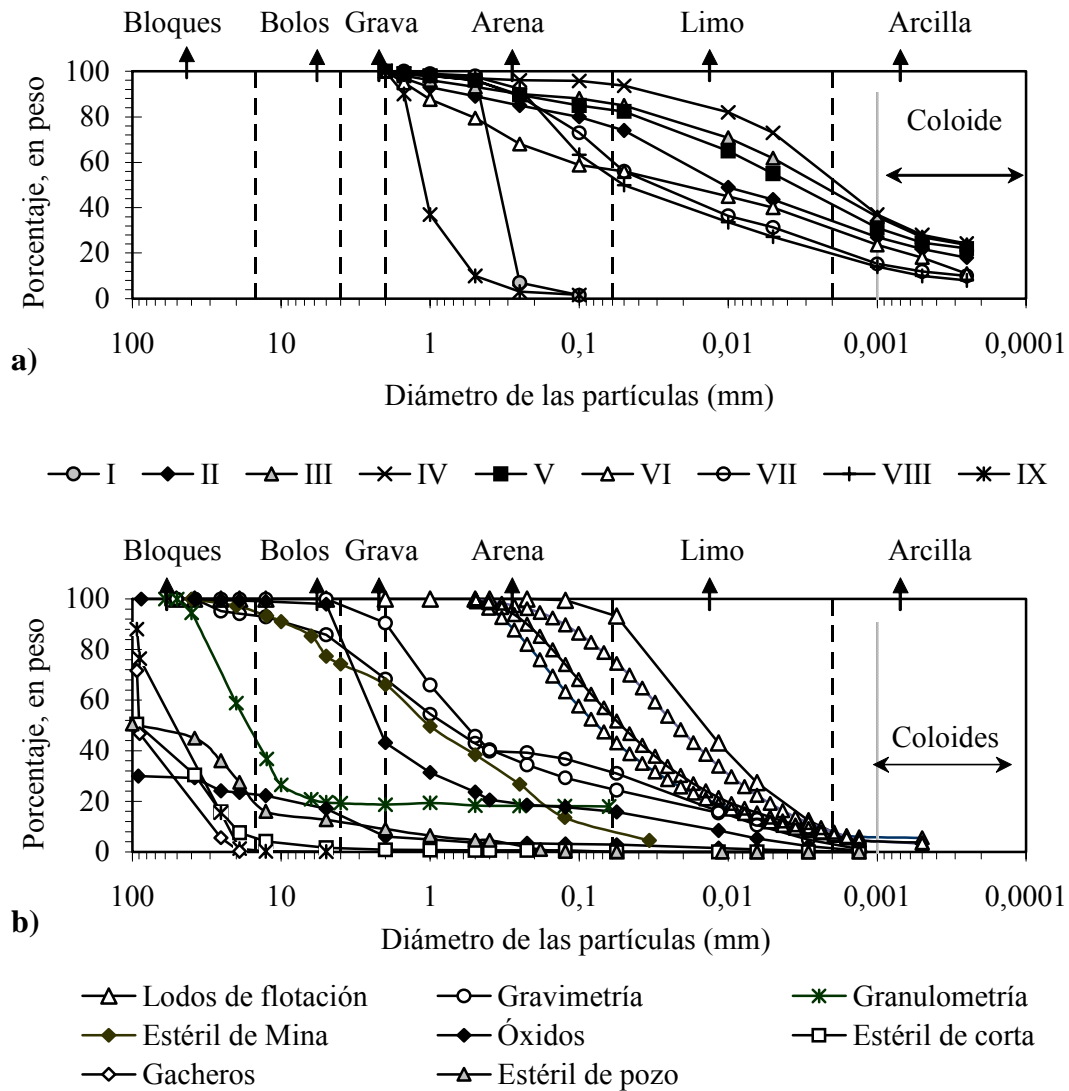


Figura 7.19. a) Representación de las características granulométricas de sedimentos del Mar Menor y b) de los residuos mineros.

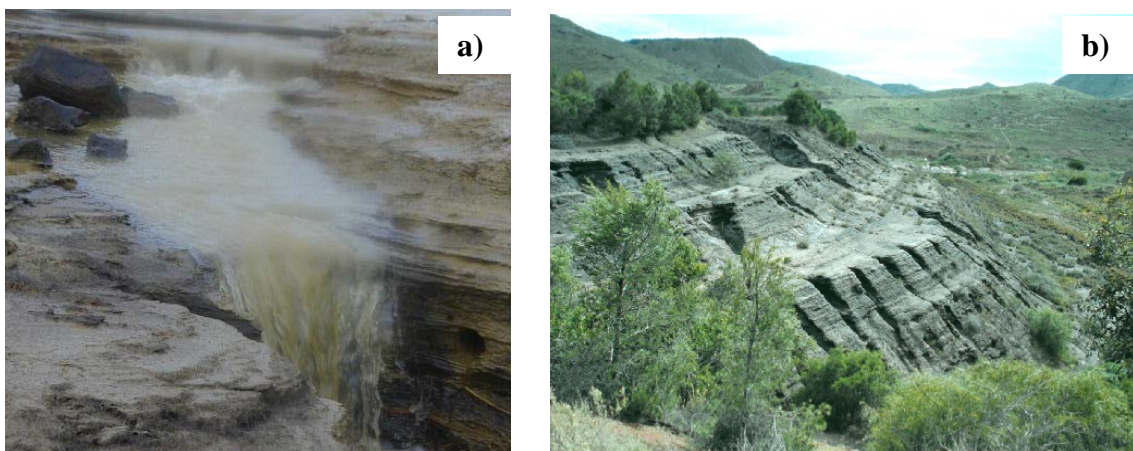


Foto 7.8 a). Superficie de una balsa por la que circula el agua de escorrentía, erosionándola. **b)** En el talud de la balsa se observa un gran desarrollo de cárcavas, a consecuencia del proceso de erosión por el agua de lluvia, observado en la foto anterior.

En la Figura 7.20 se ha representado la relación del contenido de carbonatos con las fracciones de gravas bioclásticas existentes en el lagoon (IGME, 1990). En la misma se observa que los mayores valores se encuentran en la zona costera u orilla del lagoon, donde se localizan las mayores acumulaciones de conchas de organismos marinos muertos (Foto 7.9), mientras que en el centro y sur del lagoon, se presentan los menores valores de la relación, debido a que en ellas es donde se concentran importantes espesores de fangos negros, ricos en materia orgánica (4-9%) (Figura 7.18b) y con altas concentraciones de metales pesados (Figura 7.22), y es la zona más profunda del lagoon (Figura 7.14).

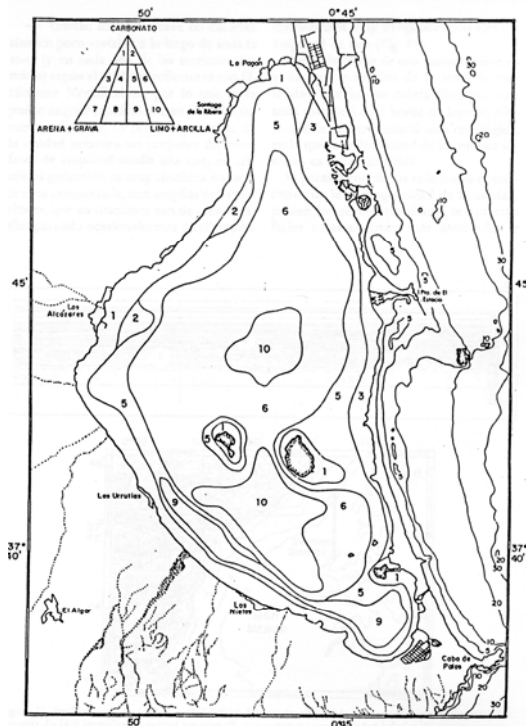


Figura 7.20. Esquema de la relación textura-carbonato en los sedimentos del Mar Menor (IGME, 1990).



Foto 7.9. Orilla del Mar Menor donde se observa la gran acumulación de conchas de animales muertos, en las proximidades de la rambla La Carrasquilla.

En la Figura 7.21 (Díaz del Río, 1993) se observa que los gradientes de mayor espesor están asociados a la región central y el sur del Mar Menor, donde se registran potencias de hasta 8 metros. Esta acumulación se corresponde con la zona de importantes espesores de fango negro (Figura 7.18b), con la de menor concentración de carbonatos (Figura 7.20), con la zona donde se depositan los sedimentos de las corrientes del agua de mar (Figura 7.16 b), con las mayores concentraciones de metales (Figuras 7.22 y 7.23) y con las zonas de mayor profundidad (Figura 7.14).

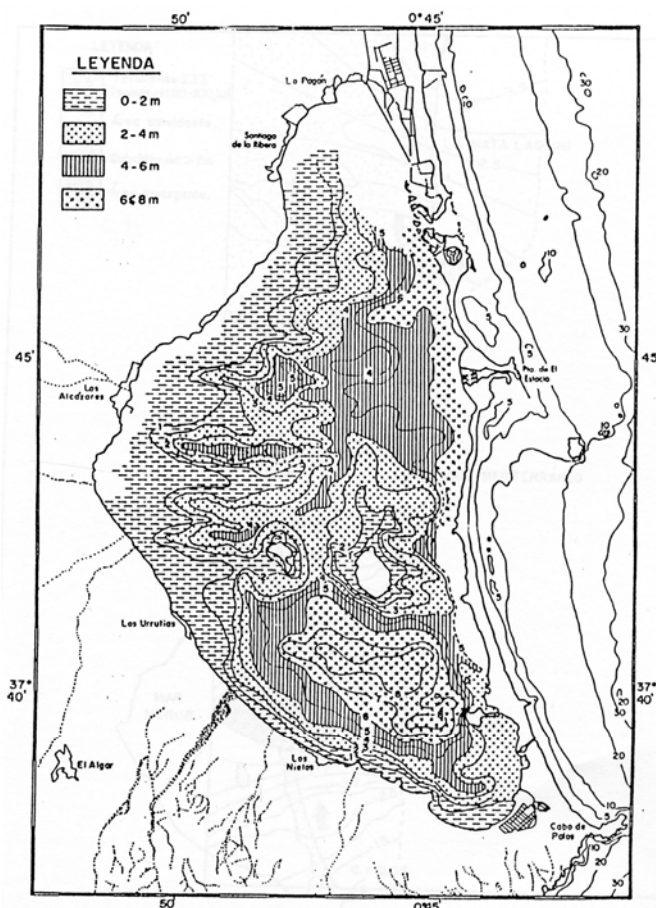


Figura 7.21. Esquema de los espesores de la unidad superior, deducidos de la interpretación de los registros sísmicos (Uniboom, 150 julios), tras realizar una conversión a metros, asumiendo una velocidad de propagación de la onda sísmica en el sedimento de 1800 m/s (Díaz del Río, 1993).

La concentración de metales en los sedimentos del Mar Menor ha sido tratada por diferentes investigadores (Simonneau, 1973; De León et al., 1982 y Sanchiz, 2002). Los resultados que se muestran en la tabla 7.4, corresponden a 130 muestras de sedimento (De León et al., 1982) y otras 2 muestras (Sanchiz, 2000) tomadas en el Mar Menor.

Tabla 7.4. Concentración de metales (ppm) en los sedimentos del Mar Menor.

De León et al., 1982 (fracción < 63 µm en 130 muestras)							
	Pb	Zn	Cu	Cd	Fe	Mn	Hg
Mínimo	<200	<500	<10	<10	<1000	<200	
Máximo	6430	6200	94	32	94000	3430	
Sanchiz et al., 2000 (fracción < 250 µm en 2 muestras)							
Mínimo	30			0,31			0,004
Máximo	89	131,4		0,60			0,034
Datos aportados en este trabajo. Muestras tomadas en las desembocaduras de las ramblas que se indican. Valores medios determinados en la fracción < 250 µm.							
Carrasquilla	3689	3500	39	24			
Ponce	1956	1985	30	25			
Beal	950	650	35	15			
Miedo	2250	2850	42	36			

En la Tabla 7.4 se puede apreciar la importancia de considerar un tipo de granulometría u otro a la hora de realizar la determinación de la concentración de metales en sedimentos (aunque para hacer una valoración más exacta se tendría que conocer el porcentaje en peso de sedimento que representa cada una de las fracciones). Se observa claramente la existencia de una variación para el Pb, Cd, Zn y Hg de un orden de magnitud entre el valor en la fracción menor de 250 micras y el de la menor de 63 micras. Esta diferencia se debe fundamentalmente a que los metales pesados se encuentran adsorbidos en la superficie de las partículas finas (arcillas y limos) y a la materia orgánica existente en estos sedimentos, los cuales tienen una mayor superficie específica y mayor capacidad de adsorción. Además, para la existencia de aguas muy alcalinas como las del Mar Menor ($\text{pH} > 8$) y una salinidad alta ($\approx 40 \text{ g/L}$), la capacidad de adsorción de los sedimentos es mayor para este tipo de metales, además la movilidad geoquímica del Pb, Zn, Cd, Cu, Fe y Mn en estas condiciones, es muy limitada.

En las Figuras 7.22 y 7.23 se aprecia que las mayores concentraciones de Pb, Cu, Zn, Fe y Mn se encuentran en la zona sur del Mar Menor, mostrando una relación directa con la zona de importante espesor de fangos negros (Figura 7.18b), mayor cantidad de arcilla (Figura 7.20) y mayor espesor de sedimento (Figura 7.21). En el caso del Cd se aprecia un comportamiento algo diferente, con importantes concentraciones en las zonas cercanas a la orilla exterior del lago y a la de las islas interiores (Figura 7.22b y Tabla 7.4). Esto puede estar motivado por la presencia de minerales en las partículas que contengan Cd en las conchas de los organismos.

La existencia de importantes concentraciones de metales en los sedimentos próximos a la zona de desembocadura de las ramblas (Carrasquilla, Ponce, Beal, Matildes, Miedo), se debe a que en esta zona se produce el contacto entre las aguas ácidas ($\text{pH} 2$ a 4) de la escorrentía superficial en los periodos de lluvias y el agua alcalina de mar ($\text{pH} > 8$), provocando una barrera geoquímica, donde se produce el precipitado de los metales al subir el pH. Una vez transcurrido este proceso, se produce una segunda distribución de los metales en disolución y los presentes en las partículas en suspensión y las partículas coloidales. Las corrientes marinas los transportan fundamentalmente hacia el centro y el sur (Figura 7.16b) de acuerdo con la dirección de la corriente. Los mayores valores de concentración de metales también se corresponden con la zona donde se produce el mayor aporte de sedimento de la escorrentía superficial, procedentes de la zona minera, en la parte sur del lagoon (Figura 7.22).

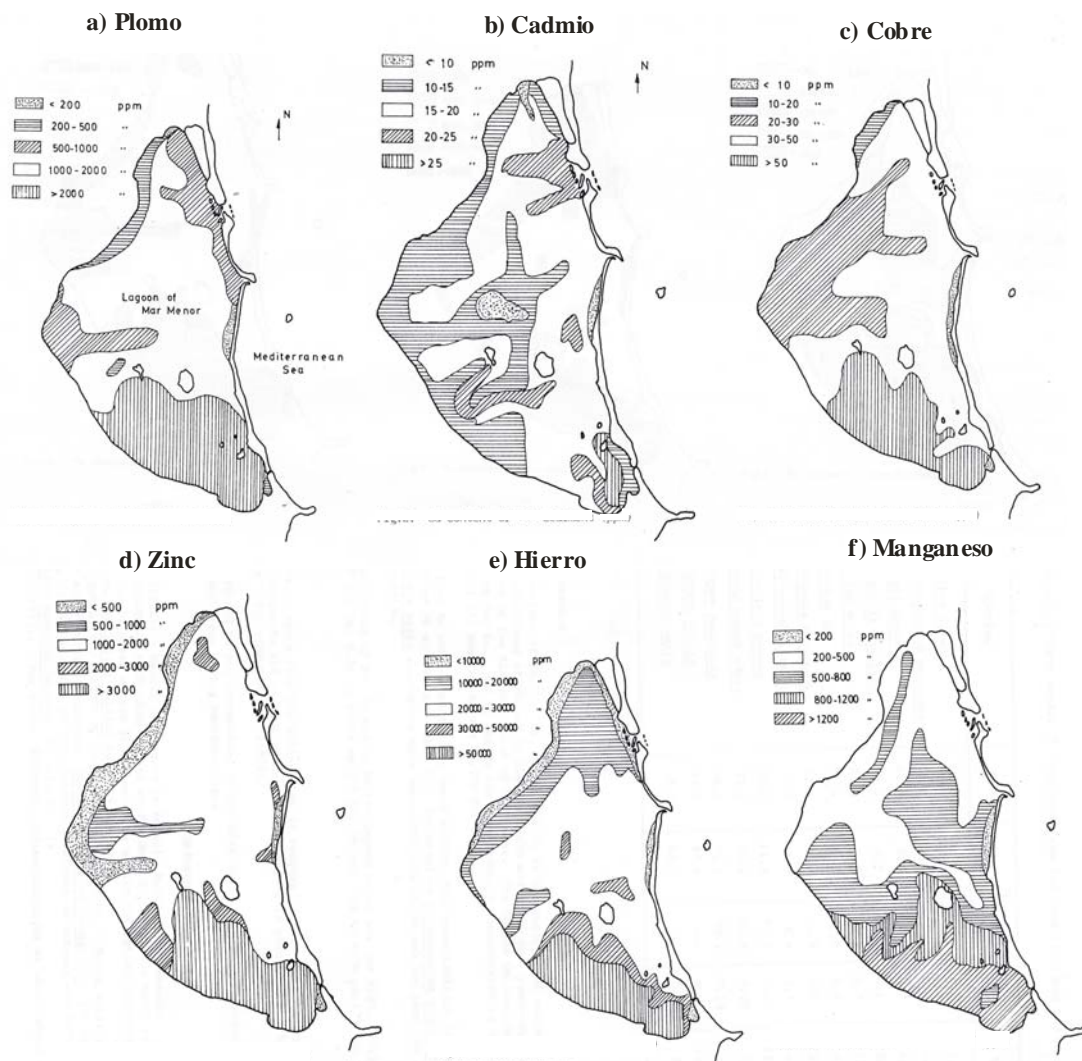


Figura 7.22. Contenido de metales en los sedimentos (<63 μm) de la laguna del Mar Menor (ppm). a: Plomo, b: Cadmio, c: Cobre, d: Zinc, e: Hierro y f: Manganeso (De León et al., 1982).

El hecho de que en la zona costera de la Manga del Mar Menor (zona que lo limita con el Mediterráneo) se encuentren menores concentraciones de metal, que en las zonas de desembocadura de las ramblas, se debe a que no existen aporte de sedimentos contaminados desde el Mar Mediterráneo, y al factor dilución que produce la entrada de agua del Mediterráneo en las cinco golas de La Manga (Figura 7.16a), que provocan el desarrollo de las corrientes dentro del lagoon, desde la orilla de La Manga hacia la costa del Campo de Cartagena (Figura 7.16b).

Con el objetivo de mostrar en profundidad la distribución de los principales contaminantes, se han realizado 2 perfiles (N-S y WNW-ESE). En ambos (Figura 7.23) se aprecia un aumento de la concentración de metales de Norte a Sur y de WNW al ESE, coincidiendo con las zonas de mayor profundidad (Figura 7.14), que son la que tienen mayor cantidad de limos y arcillas, materia orgánica y fangos negros (Figura 7.18b).

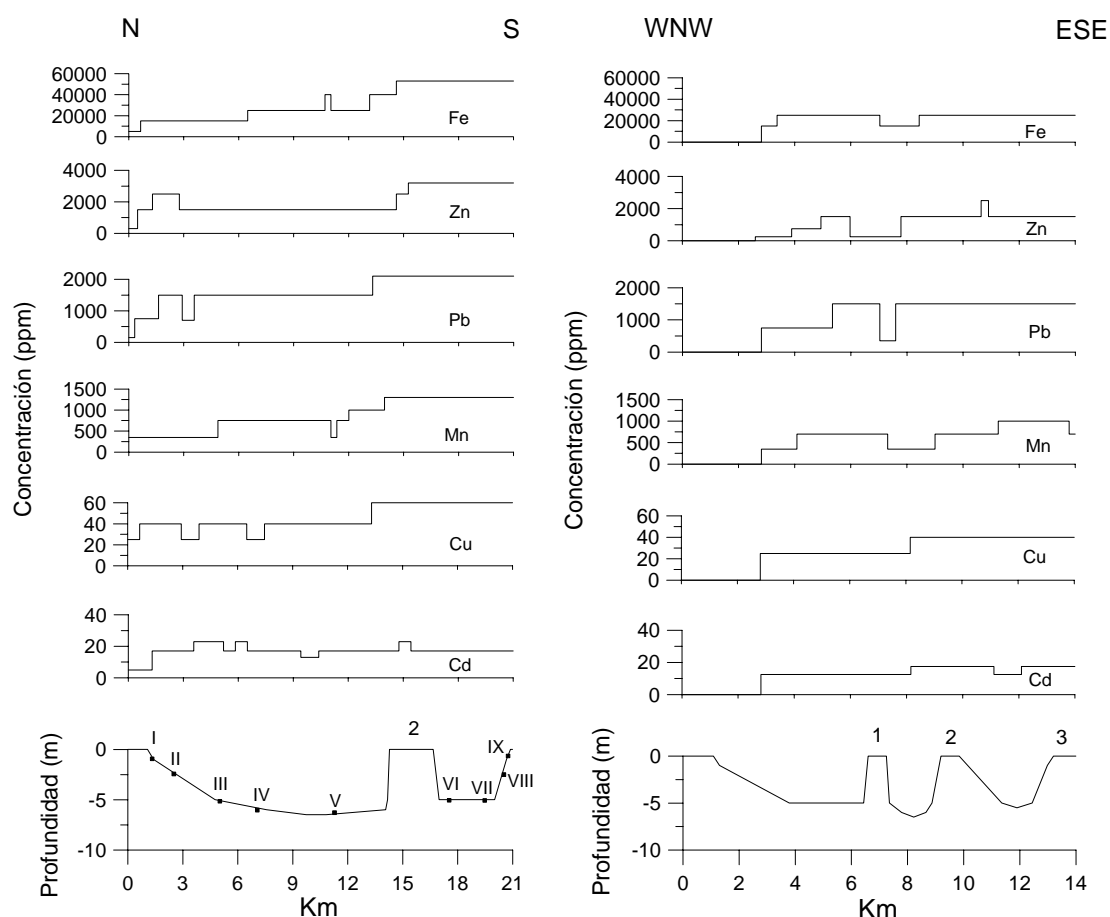


Figura 7.23. Perfiles de distribución de metales en los sedimentos de fondo en el Mar Menor 1) Isla Perdiguera, 2) Isla Mayor o del Barón y 3) La Manga del Mar Menor (en el caso de las Islas su perfil topográfico esta cortado). Los puntos representados en el perfil batimétrico N-S se corresponden con las muestras analizadas por Simonneau, (1975) y De León et al., (1985).

7.2.1.2. Impacto sobre el agua del lagoon. Calidad de las aguas

En la Tabla 7.5 se aprecia que las concentraciones de metales, en las aguas del Mar Menor, corresponden al $Zn > Pb > Cd$. Estos valores de Pb y Zn son muy superiores a los del Mar Mediterráneo en una zona no contaminada por actividad minera (playa de La Vila) y la bahía de Portman (Tabla 7.12). Esta diferencia se debe a que el Mar Menor es un sistema semicerrado, donde el agua se renueva con menor facilidad que la de la bahía de Portman, que conecta con el Mar Mediterráneo, que es un mar abierto.

Tabla 7.5. Concentraciones de metales en el agua del Mar Menor.

	Mn (ppm)	Fe (ppm)	Zn (ppm)	Pb (ppm)	Cd (ppb)	Referencia
Mar Menor						Este trabajo
Desembocadura rambla Beal						
Agua libre	0,07	0,03	0,41	0,07	0,03	
Agua intersticial	0,05	0,03	0,28	0,05	0,08	
Desembocadura rambla Carrasquilla						
Agua libre	0,06	0,02	0,05	0,06	0,02	
Agua intersticial	1,1	0,04	0,03	0,04	0,03	
Agua libre: Media			0,38	0,35	0,07	De León et al., 1982
Agua libre: Mínima			3,30	0,11	0,04	
Agua libre: Máxima			4,30	0,58	0,09	

7.2.1.3. Impacto sobre la flora y fauna marina

El estudio de la concentración de metales y de diferentes sustancias tóxicas en plantas y animales marinos, constituye uno de los aspectos más estrictos en las diferentes normativas de calidad de los alimentos en los países desarrollados. La importancia de su estudio radica en el gran número de enfermedades que generan, porque son bioacumulables.

Con el objetivo de determinar la concentración de determinados metales (Fe, Pb, Mn, Cd, Zn, Cu) en los organismos del Mar Menor, distintos autores (De León et al., 1982) han realizado un gran número de análisis en diferentes especies (Foto 7.10), que han sido efectuados en diferentes épocas (años 1982 a 2002) y se comentan a continuación.

En la Tabla 7.6 se relacionan una serie de especies en las que se ha determinado la concentración de los metales antes citados y se comparan con el Minimal Risk Level for Hazardous Sustances (MRLs) de la Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Los rangos de concentración de metales en los diferentes organismos marinos son muy amplios, y en algunos casos muy elevados. Comparando dichos valores con los de referencia MRLs., las concentraciones son superadas, en todos los análisis realizados, en más de dos órdenes de magnitud.

Tabla 7.6. Resultados de metales en organismos de la laguna del Mar Menor (ppm peso húmedo). N° muestras 130 (De León et al., 1982).

Especies	Nombre común	Fe	Pb	Mn	Cd	Cu	Zn	Suma
<i>Sparus aurata</i>	Pez dorada	23,0	1,0	0,4	0,5	2,0	13,0	39,9
<i>Lithognathus mormyrus</i>	Pez herrera	60,6	2,0	1,9	0,5	1,6	22,0	88,6
<i>Mugil auratus</i>	Mujol	12,4	1,5	0,5	0,7	1,1	8,2	24,4
<i>Anguilla anguilla</i>	Anguila	59,5	2,5	6,6	1,1	2,3	52,5	124,5
<i>Solea solea</i>	Solea	23,5	1,5	0,5	0,7	1,8	9,2	37,2
<i>Gobius sp.</i>	Gobio	16,2	2,0	1,7	0,5	0,7	16,3	37,4
<i>Penaeus kerathurus</i>	Langostino	12,2	0,4	0,3	0,5	12,0	22,2	47,6
<i>Palaemon serrathus</i>	Camarón	6,7	1,0	0,4	0,6	16,6	18,3	43,6
<i>Carcinus maenas</i>	Nécora	43,6	11,3	71,7	0,8	15,8	38,5	181,7
<i>Ceratoderma edule</i>	Berberecho	32,5	22,1	31,2	0,08	0,7	12,7	99,3
<i>Tapes decussata</i>	Almeja fina	50,8	75,6	38,1	0,14	2,4	10,4	177,4
<i>Ostrea edulis</i>	Ostra plana	43,2	47,6	---	0,51	19,2	101,6	212,1
<i>Chlamys varia</i>	Zamburiña	16,4	64,3	---	0,27	3,4	280,3	364,7
Promedio		30,8	17,9	13,9	0,53	6,1	466,6	113,7
Máximo		60,6	75,6	71,7	1,1	19,2	280,3	364,67
Mínimo		6,7	0,4	0,3	0,08	0,7	8,2	24,4
*MRLs (mg/kg/día)					0,0002	0,02	0,3	

*MRLs: Minimal Risk Levels for Hazardous Substances (ATSDR: Agency for toxic substances and disease registry).

Para el Pb la concentración varía entre 0,4 y 75,6 ppm, siendo los mayores valores para el *Tapes decussata* (75,6 ppm) y 64,3 ppm para el *Chlamys varia*. Las concentraciones de Cd son mucho menores que las de Pb, pero con un amplio rango de variación 0,08 a 1,1 ppm. Los mayores valores se registran en la *Anguilla anguilla* (1,1 ppm). En el caso del Fe, el rango de variación se encuentra entre 6,7 y 60,6 ppm. Los mayores valores son para el *Lithognathus*. El Manganeseo varía entre 0,3 y 71,7 ppm, presentando el mayor valor el *Carcinus maenas*. El rango del cobre también es elevado, entre 0,7 y 19,2 ppm, siendo el mayor el de la *Ostrea edulis*. Para el zinc se registran las mayores concentraciones de metales con rango muy amplio, que oscila entre 8,2 (*Mugil auratus*) y 280,3 ppm (*Chlamys varia*) (Figura 7.24), aunque hay que señalar que en 11 de las especies analizadas, el valor se mantiene dentro de mismo orden de magnitud (8-38 ppm).

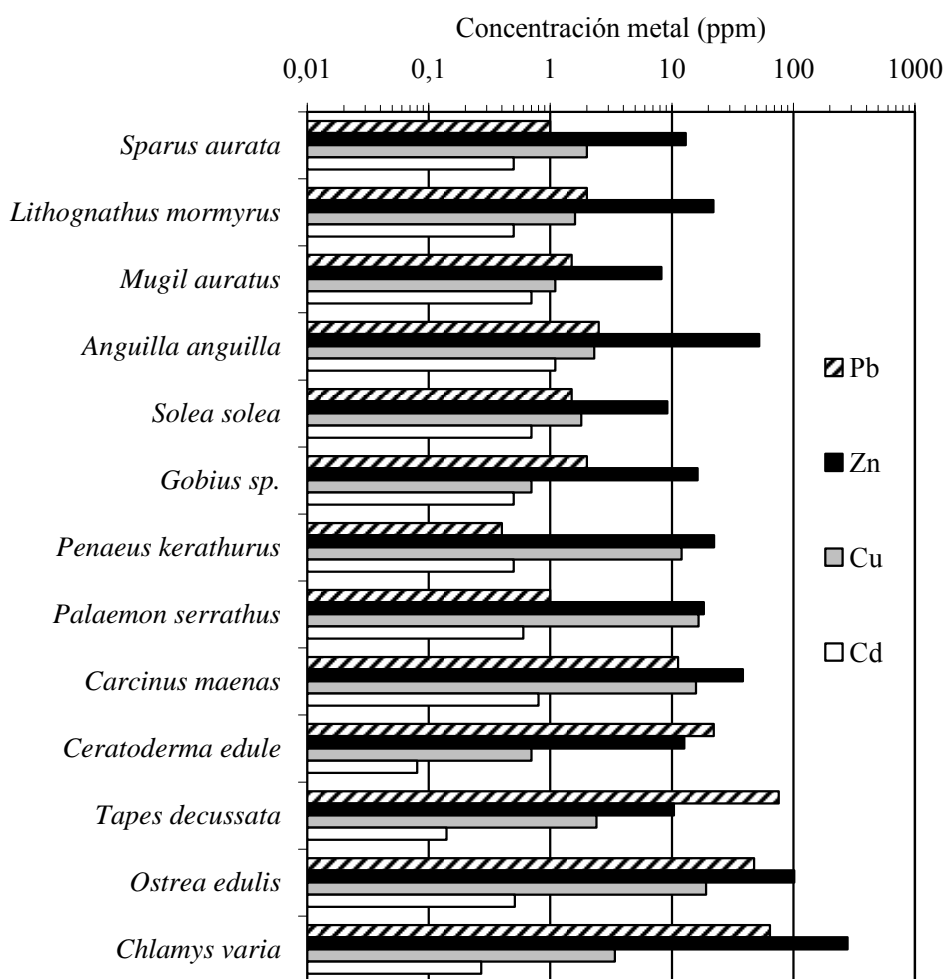


Figura 7.24. Concentración de metales en diferentes organismos marinos en el Mar Menor. Gráfica elaborada con los datos de la Tabla 7.6.

De la Tabla 7.6 y la Figura 7.24, se puede deducir que en ninguna de las especies analizadas se repite el máximo valor de concentración para el mismo metal.

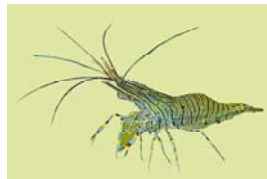
*Sparus aurata* (pez dorada)*Gobius sp.* (gobio)*Lithognathus mormyrus* (pez herrera)*Penaeus kerathurus* (langostino)*Mugil auratus* (mujol)*Solea solea* (solea)*Anguilla anguilla* (anguila)*Carcinus maenas* (nécora)*Palaemon serrathus**Ostrea edulis* (ostra plana)*Ceratoderma edule* (berberecho)*Tapes decussata* (almeja fina)*Chlamys varia* (zamburiña)

Foto 7.10. Imágenes de la fauna en la que se analiza la concentración de metales que se relaciona en la Tabla 7.7.

En el año 1996, el I.E.O. (Instituto Español de Oceanografía), para determinar la biodisponibilidad de metales pesados (Pb, Zn, Cu, Cd), analizó la concentración de

éstos en ostras (*Ostrea edulis*) distribuidas en cinco puntos del Mar Menor (Encañizada, aeropuerto, ramblas del Albuñón y Beal e Isla del Barón). Si se comparan los resultados del IEO con los obtenidos por De León et al., (1982), en muestras húmedas, se observa (Tabla 7.7, Figura 7.25 y Foto 7.10 Fotos tomadas de: www.mondomarino.net; www.maestropescador.com ; www.marinbi.com ; www.unice.fr) que las concentraciones de metales resultan siempre de mayor valor en las muestras secas que en las determinadas en las muestras húmedas. Esto se explica por los valores del potencial redox (Eh) y pH, que son las dos principales variables que controlan el comportamiento químico de los metales en los ecosistemas marinos. En la mayor parte de los fondos marinos del Mar Menor, el ambiente es anóxico, tomando el Eh valores menores de 100 mV. Esto favorece que el pH se sitúe entre 7,2 y 8,4 y que los metales permanezcan unidos a la fase sólida, y por tanto sean mayores sus concentraciones en las muestras secas.

Tabla 7.7. Concentración de metales en *Ostrea edulis* (ostra plana) del Mar Menor (Varios autores).

Concentraciones en ppm de peso seco. Rosique, 2000-Benedicto et al., 1996.					
	Pb	Zn	Cu	Cd	Hg
V. Mínimo	8	4358	32	0,78	0,040
V. Máximo	803	7017	89	1,58	0,069
Concentraciones en ppm de peso húmedo (De León et al., 1982)					
V medio	47,6	101,6	19,2	0,51	
MRLs (mg/kg/día)		0,3	0,02	0,0002	

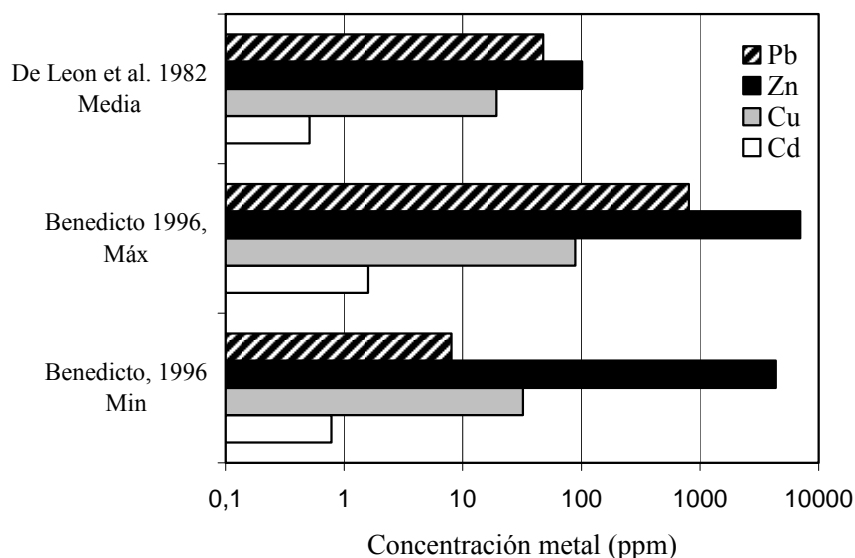


Figura 7.25. Representación de las concentraciones de metales en *Ostrea edulis* (ostra plana) del Mar Menor. Datos de la Tabla 7.7.

Además, los resultados de los análisis realizados en 8 muestras de *Cerastoderma edule glaucum* (almeja) y *Venerupis aurea* (almeja dorada) (Foto 7.11 Fotos tomadas de: www.martin.ac.uk, www.bigai.ne.jp) del Mar Menor (Tabla 7.8 y Figura 7.27), muestran que los mínimos se obtienen en la muestra nº 1, situada en la parte más alejada de la zona minera y los máximos se encuentran en las muestras nº 4, 5, 6 y 7 situadas en la desembocadura de las ramblas (Beal, Ponce y Carrasquilla) que están afectadas por la existencia de importantes acumulaciones de residuos en su cabecera (Figura 7.12).

Tabla 7.8. Concentración (en ppm) de Fe, Zn y Mn en conchas de *Cerastoderma edule glaucum* (almeja) y *Venerupis aurea* (almeja dorada) en el Mar Menor para 8 muestras (Auernheimer, 1984).

Muestra	Rambla o canal	Fe	Zn	Mn	Total
<i>Cerastoderma edule glaucum</i> (almeja)					
1	Ventorrillo ^c	55,47	3,22	8,27	66,96
2	Ventorrillo ^c	89,72	3,24	Tr.	92,96
3	Alcazares, Estacio ^c	92,77	9,16	50,13	152,06
4	Miedo	129,08	11,94	45,54	186,56
5	Matildes	827,42	95,32	287,48	1210,22
6	Beal	950,42	22,90	111,90	1085,22
7	Carrasquilla	152,60	23,15	48,68	224,43
8	Marchamalo ^c	62,25	4,01	0,58	66,84
Promedio		294,97	21,62	78,94	385,66
Máximo		950,42	95,32	287,48	1210,22
Mínimo		55,47	3,22	0,58	66,84
<i>Venerupis aurea</i> (almeja dorada)					
1	Ventorrillo	43,37	3,45	5,88	52,70
2	Ventorrillo	60,11	6,03	4,10	70,24
3	Alcazares, Estacio	56,39	11,08	33,93	101,40
4	Miedo	369,15	39,27	144,85	553,27
5	Matildes	338,53	47,66	100,68	486,87
6	Beal	4091,58	302,51	243,01	4637,10
7	Carrasquilla	208,33	49,45	61,99	319,77
8	Marchamalo	364,04	19,13	18,35	401,52
Promedio		691,44	59,82	76,60	827,86
Máximo		4091,58	302,51	243,01	4637,10
Mínimo		43,37	3,45	4,10	52,70
MRLs (mg/kg/día)			0,30		

Tr: trazas

*Cerastoderma edule glaucum* (almeja)*Venerupis aurea* (almeja dorada)**Foto 7.11.** Imágenes de las especies en las que se analiza la concentración de metales que se relacionan en la Tabla 7.8.

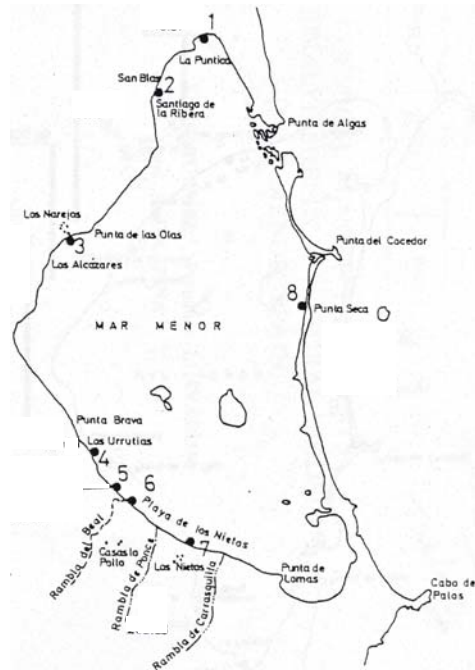


Figura 7.26. Puntos de muestreo de *Cerastoderma edule glaucum* (almeja) y *Venerupis aurea* (almeja dorada) en el Mar Menor (Auernheimer, 1984).

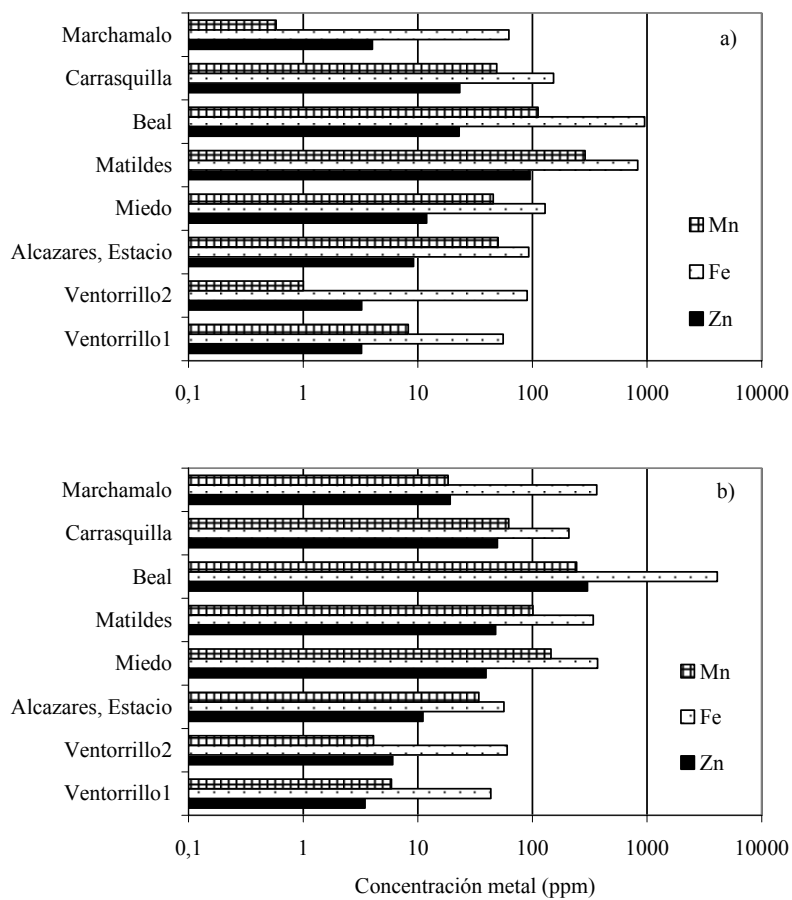


Figura 7.27. Representación de la concentración de metales (ppm) en a) *Cerastoderma edule glaucum* (almeja) y b) *Venerupis aurea* (almeja dorada) en el Mar Menor (Auernheimer, 1984). Elaborado con datos de la Tabla 7.8.

Por otro lado, el estudio de la concentración de metales en las plantas del medio marino es de vital importancia, pues ellos constituyen uno de los eslabones de la cadena trófica. En el Mar Menor se ha realizado la determinación de tres especies (Tabla 7.9).

Tabla 7.9. Metales pesados contenidos en una muestra de macrophytas* del Mar Menor (Sanchiz, 2000).

			Cd (ppm)	Zn (ppm)	Pb (ppm)	Hg (ppb)
<i>Cymodocea nodosa</i>	Mar Menor a	Raiz	0,14	29,65	38,43	19,50
		Rizoma	0,23	20,00	8,63	< 7,20
		Hojas	0,16	76,59	126,00	15,0
<i>Ruppia cirrhosa</i>	Mar Menor b	Raiz	0,48	54,64	37,36	62,07
		Rizoma + retoño	0,57	37,58	11,70	44,14
		Hojas	0,34	67,92	28,53	33,10
<i>Caulerpa prolifera</i>	Mar Menor a	Rhizoids + stolons	0,20	28,77	35,13	< 8
		Fronds	0,14	31,70	36,06	< 8

* Macrophytas: plantas vasculares con flor que viven en el agua

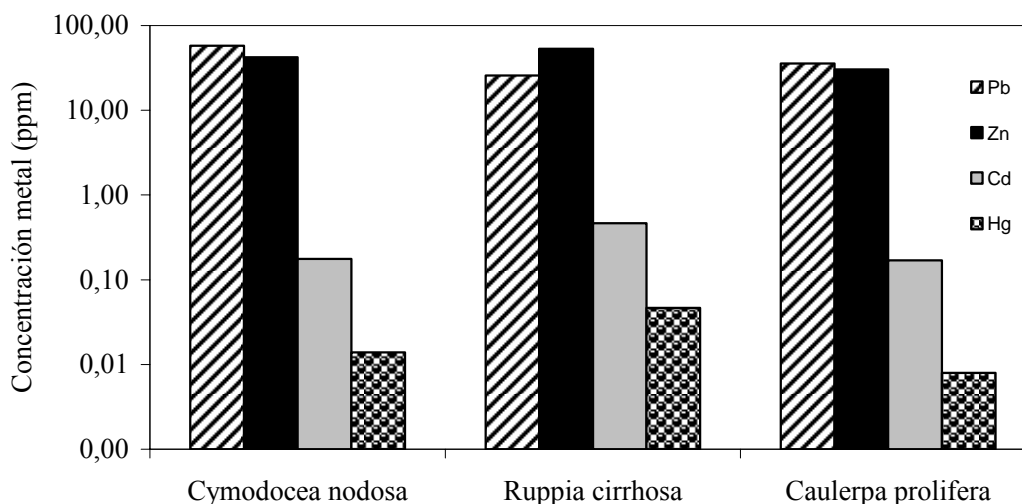


Figura 7.28. Concentración media de metales, en diferentes plantas del Mar Menor. (Elaborada con datos de la Tabla 7.9).

En la Tabla 7.9 (Foto 7.12 Fotos tomadas de: www.icampiflegrei.it) y Figura 7.28 se puede apreciar que la concentración de Cd y Zn es de un rango de concentración similar, independientemente de la parte de la planta que se analiza. En el caso del plomo para la *Cymodosa nodosa*, la concentración en las hojas es un orden de magnitud mayor, para las otras partes de la planta y para las otras dos especies analizadas. En el caso del mercurio, se aprecia que en la *Ruppia cirrhosa* hay una gran concentración.



Cymodocea nodosa



Ruppia cirrhosa



Culerpa prolifera

Foto 7.12. Imágenes de las especies en las que se analiza la concentración de metales que se relacionan en la Tabla 7.9.

Hay que señalar que los problemas del Mar Menor no son solo debidos a las actividades mineras, sino que existen impactos provocados por la actividad agrícola desarrollada en el glacis del Campo de Cartagena, y las obras de ingeniería civil que se han llevado a cabo en la Manga del Mar Menor.

Los canales originados en el brazo arenoso que constituye La Manga del Mar Menor, actúan como activas vías de intercambio acuoso. La acción del hombre en la labor de encauzamiento, profundización o apertura de los canales, ha acarreado una serie de consecuencias nefastas para el equilibrio ecológico del sistema en la interfase sedimento-agua. Uno de esos problemas es la disminución de la salinidad y la temperatura del lagoon. El otro problema es la actividad agrícola que ha provocado el aporte de nutrientes y materia orgánica al lagoon. Además, la llegada del trasvase Tajo-Segura y el riego en la agricultura, han provocado una subida del nivel freático y un aumento del aporte de agua dulce al mar (Rodríguez Estrella, 1995). Es de señalar que estos problemas requieren otro tipo de estudio que no es objeto de esta tesis.

7.2.2. IMPACTO SOBRE EL MAR MEDITERRÁNEO

La Sierra de Cartagena-La Unión está limitada en su parte meridional por el Mar Mediterráneo. Sus 30 km aproximados de costa se extienden desde el Cabo de Palos en la parte más oriental, hasta el puerto de Cartagena en la occidental.

La salinidad media del Mar Mediterráneo en esta zona litoral, medida entre los años 1970 a 1989, es de 37 g/l (Rodríguez y López, 1992).

Esta zona costera se encuentra dentro de las denominadas zonas especialmente protegidas de importancia para el Mediterráneo (ZEPIM). Uno de los aspectos más singulares de la misma son las praderas de *posidonia oceanica oceanica* que constituyen uno de los pulmones de Mediterráneo (CAAMA, 2002).

7.2.2.1. Acumulación de sedimentos en la bahía de Portman

A través de las ramblas que provienen de la Sierra Minera (Portman, Gorguel, Escombreras, Santa Lucía y Hondón), han llegado (y aun lo hacen), sedimentos procedentes de los residuos que se encuentran depositados en las diferentes cuencas hidrográficas (ver Capítulo 4, Tabla 4.7).

Como se ha comentado en el apartado 7.1.4, desde los inicios de la minería en tiempos pre-romanos, hasta el año 1957, las ramblas que desembocan en el Mar Mediterráneo y el Mar Menor eran empleadas como zona de vertido directo de los materiales estériles generados en los diferentes procesos minero-metalúrgicos. En el año 1957 se prohibió el vertido de los lodos de flotación en las ramblas, pero no finalizó el vertido de los otros tipos de residuos mineros a los cauces o cabeceras de las ramblas. A partir del año 1957 comenzó el vertido de lodos en la bahía de Portman. Primeramente con una tubería de 300 mm de diámetro enterrada en la playa, con su extremo libre ubicado por debajo del nivel del mar, por el que se vertían 3000 t/día de lodos (González y Baños, 1987). En el año 1967 se cambia la forma de vertido por la que se muestra en la Foto 7.13, vertiendo 335 m³/hora de lodos (González y Baños, 1987).



Foto 7.13. Tubería del vertido de lodos, procedentes del proceso de flotación diferencial, a 400 m al Oeste de Punta Galera (González y Baños, 1987).

Los 25 Mm³ de lodos vertidos al Mar Mediterráneo, han aterrado (Martínez et al., 1993) la bahía de Portman (Figura 7.29), sepultado la playa original y creado playas artificiales en las bahías de Portman y Gorguel, de unos 0,8 y 0,2 km² respectivamente. En la figura 7.29 se muestra la evolución de la línea de costas y la batimetría de la bahía de Portman. Además, el aporte de sedimentos ha afectado los fondos marinos desde los cabos Tiñoso a Palos. También han provocado la contaminación del agua de mar y el fondo marino con sedimentos ricos en metales pesados, los cuales se analizan a continuación.

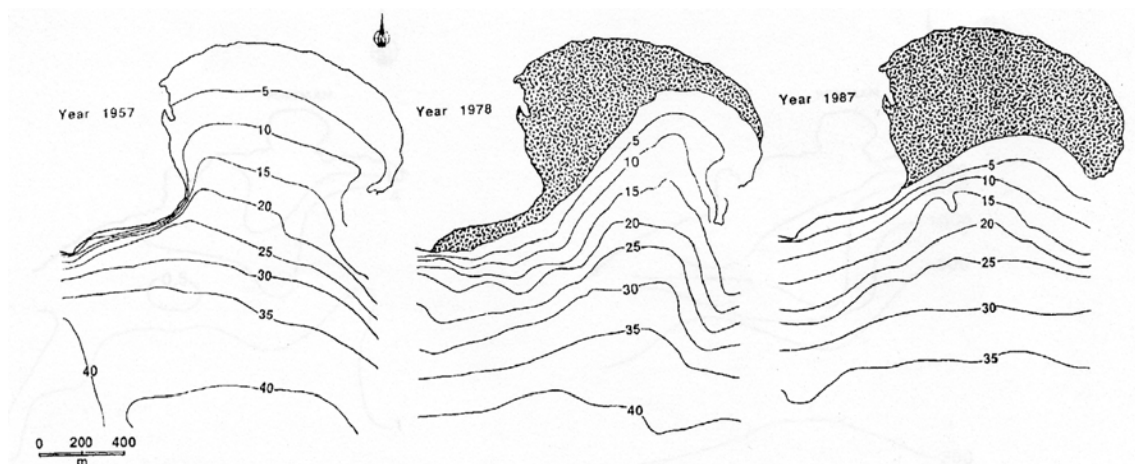


Figura 7.29. Evolución de la batimetría en la Bahía de Portman (Martínez et al., 1993).

7.2.2.2. Concentración de metales en los sedimentos de la Bahía de Portman

En la Figura 7.30 (IEO, 1984) se han representado las concentraciones de los metales Cd, Zn y Pb, en muestras de sedimentos tomadas en el año 1984, época en que estaba en actividad el lavadero Roberto, es decir que se producían vertidos. Se observa un gradiente de las concentraciones, decreciente desde la costa hacia el interior del Mar Mediterráneo, para los metales Cd, Zn y Pb, en los sedimentos del fondo marino de la bahía de Portman. Se puede apreciar como las concentraciones de Pb y Zn son más dos órdenes de magnitud mayor que la de Cd. Si se analiza la Tabla 7.10 (los datos son posteriores al cese de los vertidos), se ve que en las tres estaciones analizadas, la concentración de Cd es muy similar a la de la Figura 7.22. Sin embargo el Zn y el Pb muestran un valor muy inferior (tres órdenes de magnitud) con respecto a la concentración de los sedimentos en la bahía de Portman (Tabla 7.10).

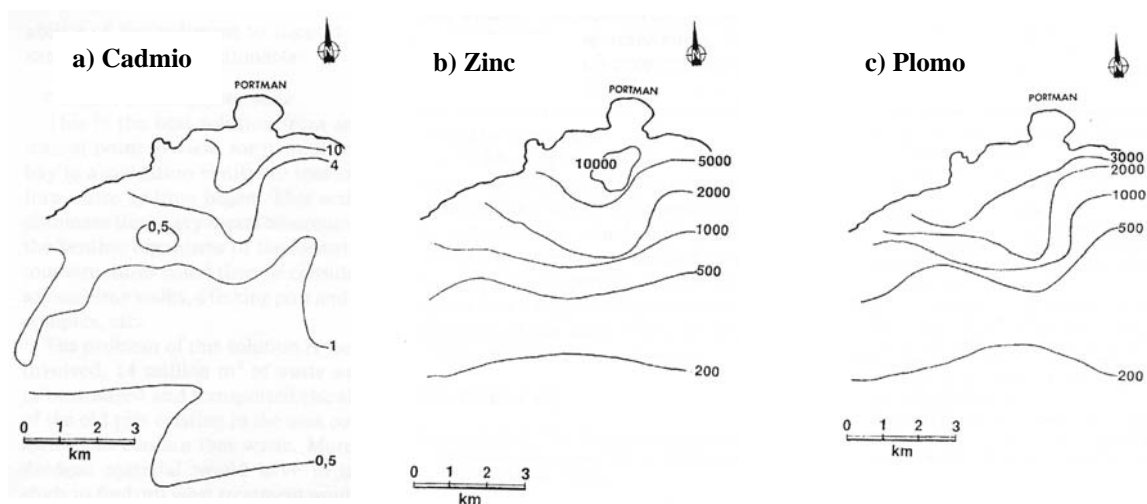


Figura 7.30. Contenido de metales (ppm) en sedimentos de la Bahía de Portman. a: Cadmio, b: Zinc, c: Plomo (Instituto Español de Oceanografía. Murcia, 1984).

Tabla 7.10. Concentraciones (valor medio \pm SD; Dutrieux, 1997) de 5 metales pesados en los sedimentos de fondo en 3 estaciones investigadas (Deheyn, 2000).

Estación y coordenadas	D (m)	Metales pesados (ppm)				
		Cd	Cu	Fe	Pb	Zn
Estación 0 (37°N 34,7' 0°W 48,9')	3500	4,1 \pm 0,9	14,3 \pm 3,8	9,3 \pm 1,7	260 \pm 50	520 \pm 160
Estación 1 (37°N 34,8' 0°W 49,8')	1200	7,9 \pm 4,0	21,4 \pm 8,3	105,5 \pm 41,7	2430 \pm 1110	3470 \pm 1930
Estación 2 (37°N 34,8' 0°W 50,5')	500	18,8 \pm 4,1	44,9 \pm 7,7	216,7 \pm 26,9	6230 \pm 1100	8970 \pm 2250

D es la distancia entre la estación considerada y la Bahía de Portman (ver Figura 7.31). SD: desviación estandar.

Esto se debe a que el sedimento vertido en el mar fue transportado por las corrientes marinas y depositado en la zona costera. Normalmente los sedimentos transportados por el mar son los más finos. Además, hay que señalar que, con menor importancia e influencia en su colmatación, esta zona de la bahía no solo ha sido afectada por el vertido de sedimentos del lavadero Roberto, sino que se han vertido los lodos de diferentes lavaderos durante el dilatado periodo de las actividades minero-metalúrgicas en la Sierra Minera hasta el año 1956, así como el aporte de sedimentos de las corrientes de aguas superficiales.

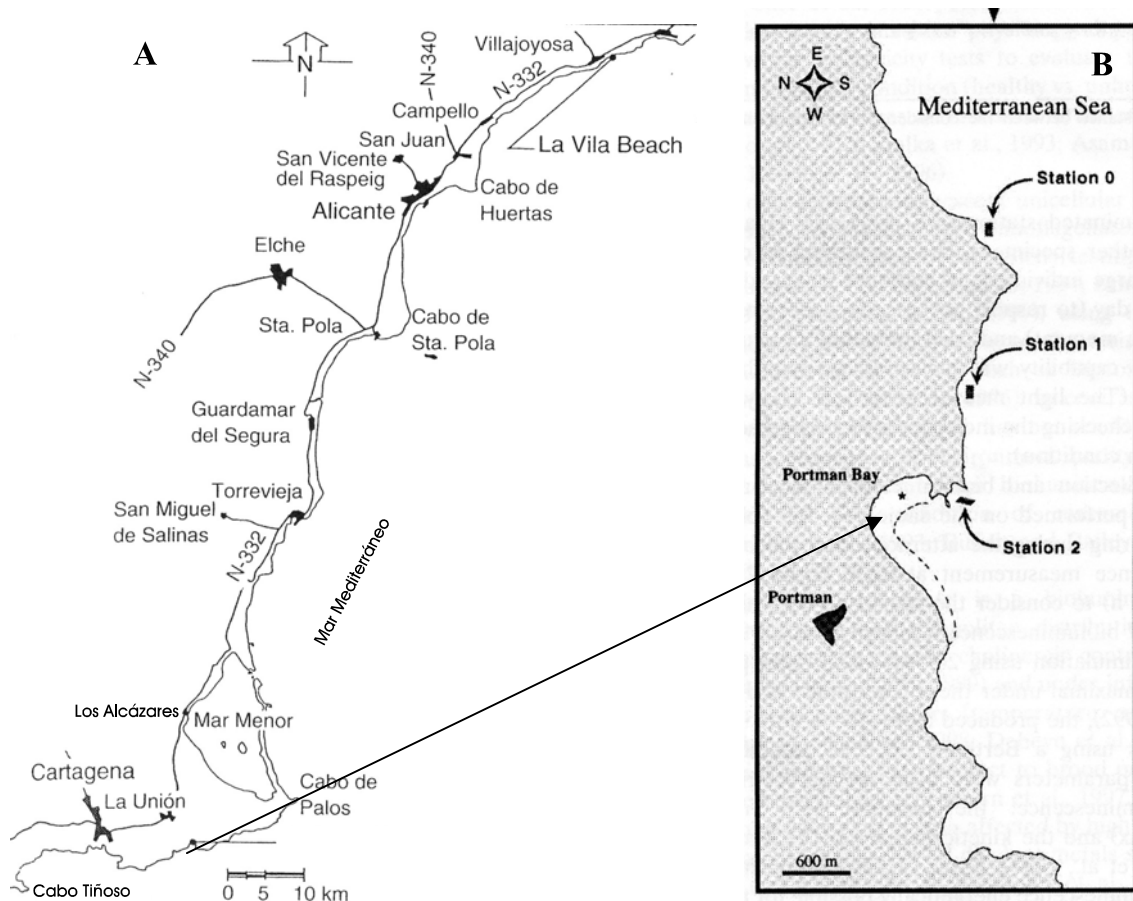


Figura 7.31. A: Localización de los puntos de muestreo: Bahía de Portman y playa La Vila. (Auernheimer, 1997). **B:** Localización de las tres estaciones donde se tomaron muestras de *Amphipholis squamata* (estrella de mar) en el Mar Mediterráneo (Bahía de Portman) (Dimitri, 2000).

Con el objetivo de ver el efecto de los vertidos de la bahía de Portman sobre el litoral Mediterráneo, se han utilizado los datos de Dutrieux, (1997). En la Tabla 7.10 y la Figura 7.32 se observa un gradiente decreciente de la concentración de los cinco metales (Cd, Pb, Zn, Cu y Fe) con la distancia a la bahía de Portman, que es la zona de acumulación de los lodos de flotación. Se puede apreciar que la concentración de Pb, Zn y Fe disminuye prácticamente un orden de magnitud entre la estación más cercana (estación 2, bahía de Portman) y la más alejada (estación 0). En el caso del Cd y Cu es de unas cuatro veces la diferencia entre las estaciones extremas.

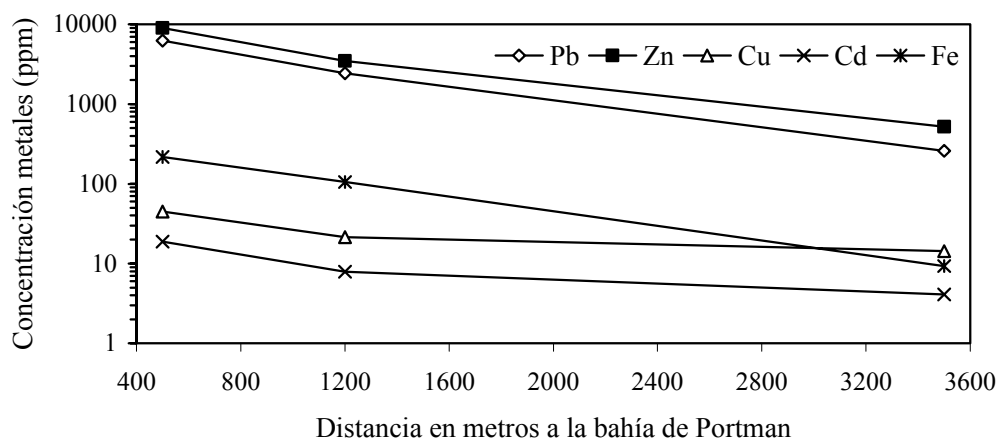


Figura 7.32. Concentración de metales (ppm) en función de la distancia a la bahía de Portman (Elaborada con datos de la Tabla 7.10).

En la Tabla 7.11 se aprecia como los sedimentos de la bahía de Portman presentan una elevada concentración de metales Pb, Zn, Fe y Mn, muy superior a las de la playa La Vila (Figura 7.31). En el caso de las rocas sumergidas, las concentraciones de metales (Fe, Mn, Zn, Pb y Sr) en la bahía de Portman superan en más de un orden de magnitud a las de la playa La Vila.

Tabla 7.11 Concentración de elementos (ppm) en 10 muestras de sedimentos y substrato de la Bahía de Portman y Playa La Vila (Auernheimer, 1997).

	Mn	Fe	Zn	Pb	Mg	Sr
Bahía de Portman						
Sedimentos de playa	5391	132375	5950	1802	5650	11,00
Rocas sumergidas	9989	97725	6356	57797	13225	4,25
Playa La Vila						
Sedimentos de playa	70	1290	12,50	15,00	4238	427,50
Rocas sumergidas	181	5101	22,00	16,50	12350	846,50

7.2.2.3. Impacto sobre el agua del Mar Mediterráneo. Calidad del agua en la bahía de Portman

En la Tabla 7.12 se observa como la concentración de metales en el agua intersticial de las muestras tomadas en las bahías de Portman y Gorguel (que está en contacto directo con los residuos mineros), presentan siempre una concentración mayor que las obtenidas en la playa La Vila (que no está afectada por los citados residuos) (Figura 7.31). En el caso de los metales Zn, Pb y Mn, la concentración presenta más de un orden de magnitud de diferencia entre Portman-Gorguel y La Vila, en tanto que las de Mg y Sr son similares.

También se aprecia en la Tabla 7.12 que, en las muestras tomadas de agua libre, son mayores las concentraciones de Portman-Gorguel que La Vila en los metales Mn, Pb, y Fe. Sin embargo, en el caso del Zn, las concentraciones son similares. El hecho de que

lo sean puede estar relacionado con el elevado fondo geoquímico que presentan los materiales geológicos en toda la zona litoral o la posibilidad de existencia de otra fuente que aporte Zn a la zona de la playa La Vila.

Tabla 7.12. Concentración de elementos (ppm) en muestras de agua de las Bahía de Portman y Gorguel, y de la playa La Vila.

	NM	Mn (ppm)	Fe (ppm)	Zn (ppm)	Pb (ppm)	Cd (ppb)	Mg (ppm)	Sr (ppm)	Autores
Bahía de Portman ¹									
Agua libre (agua de mar)	10	0,080	0,031	0,118	0,037		772	7,14	Auernheimer, 1997.
Agua intersticial	10	1,171	0,095	1,113	0,194		834	7,46	
Bahía de Portman ¹									
Agua libre	1	0,068	0,02	0,200	0,025	0,04			Este trabajo Julio, 2003
Agua intersticial	1	1,050	0,08	1,200	0,170	0,03			
Bahía del Gorguel ¹									
Agua libre	1	0,070	0,030	0,040	0,030	0,025			Este trabajo Julio, 2003
Agua intersticial	1	1,200	0,090	0,030	0,020	0,015			
Playa La Vila ²									
Agua libre (agua de mar)	10	0,008	0	0,102	0,017		854	7,21	Auernheimer, 1997.
Agua intersticial	10	0,010	0	0,112	0,002		851	7,37	

¹ Aguas afectadas por el vertido de lodos mineros. ² Aguas no afectadas por los lodos mineros. NM: número de muestras.

En la Tabla 7.13 se relacionan datos de concentración de metales en diferentes puntos del Mediterráneo, a distintas distancias de la costa, en muestras tomadas en el año 1984, mientras se realizaban vertidos de lodos en la bahía de Portman. Si se comparan con las de la Tabla 7.12, cuyas muestras fueron cogidas después del cese de los vertidos, se puede observar que los problemas de contaminación continúan en el año 2003, aunque hay que señalar que se aprecia una disminución considerable en la concentración de los metales.

Tabla 7.13. Concentración de elementos (ppm) en muestras de agua en varios puntos del Mediterráneo (IEO, 1984).

Agua en superficie. Julio 1984						
	D (m)	Guardamar	Portman	Cartagena	Almería	Carboneras
Cd	0	1,1	0,55	0,116	0	0
	1852	0,042	0,016	0,046	0	0
	3704	0,05	0	0	0,016	0
	7408	0	0,03	0,014	0	0
Pb	0	1,04	13,7	0,81	0	0
	1852	0,91	0,33	0,28	0	0
	3704	0,61	0	0	0,42	0
	7408	0	0,64	0,35	0	0
Zn	0	6,3	7,65	7,45	0	0
	1852	5,3	1,9	5,16	0	0
	3704	3,85	0	0	2,71	0
	7408	0	4,82	5,16	0	0
Agua de fondo. Julio 1984						
Cd	0	0,066	0,357	0,041		
	1852	0,06	0,194	0,044		
	3704	0,063			0,013	0,02
	7408		0,024	0,032		
Pb	0	0,59	1,15	0,38		
	1852	0,95	0,35	0,28		
	3704	1,37			0,8	
	7408		0,72	0,65		
Zn	0	4,6	8,6	5,5		
	1852	4,9	7,6	3,1		
	3704	4,1			3,3	3,1
	7408		3,2	3,1		

D: distancia a la costa.

7.2.2.4. Impacto sobre la flora y fauna en la bahía de Portman

Los vertidos de lodos al Mediterráneo por parte de la empresa Peñarroya, han provocado la contaminación del litoral y la colmatación y desaparición de gran parte de la bahía de Portman, su puerto y sus playas (Figura 7.29), así como la bahía del Gorguel, y ha afectado gran parte del litoral incluyendo la flora y fauna que en él se desarrolla.

Con el objetivo de poder determinar el efecto o impacto ambiental de las actividades mineras sobre la flora y fauna de la parte del referido litoral mediterráneo, se han analizado diferentes trabajos, separados en tiempo y distancia (IEO, 1984; Auernheimer, 1997; Dimitri, 2000). En la Foto 7.14 se muestran las diferentes especies en las que se han analizado la concentración de varios metales.

En el caso de las placas del erizo rojo (Tabla 7.14), la concentración de Mn en Portman y la playa de La Vila es de dos órdenes de magnitud mayor en el primero. En el caso del

Fe, Zn y Pb, la concentración en la bahía de Portman es algo más de un orden de magnitud que en la playa de la Vila. Para el caso del Sr y Hg, se aprecian valores similares. Esto se debe a que los materiales geológicos presentes en la zona tienen una composición litológica y concentración de estos elementos similares.

En las placas del erizo negro (Tabla 7.14 y Foto 7.14 Fotos tomadas de: www.mondomarinero.org; www.ittofauna.org), la concentración de Mn, Fe y Pb es más de un orden de magnitud mayor en la bahía de Portman que los valores detectados en la playa de la Vila. Para el Zn, la concentración es dos veces superior. Para el caso del Mg y Sr sucede lo mismo que en el erizo rojo.

En las espinas del erizo rojo, la concentración de Mn es más de un orden de magnitud en la bahía de Portman que en la playa la Vila. En el caso del Zn, es el doble, y para el Fe y Mn es relativamente superior. Para el Mg y Sr, la concentración es similar al erizo negro (Figura 7.33).

Tabla 7.14. Comparación de metales contenidos (ppm) en *Paracentrotus lividus* (erizo rojo) de la Bahía de Portman y Playa La Vila (Auernheimer, 1997) y en peces de cefalópodos en la bahía de Porman (IEO, 1984).

	Hg	Cd	Pb	Zn	Mg	Mn	Fe	Sr	Autor
Bahía de Portman¹									
<i>Paracentrotus</i>									
Placas (n = 10)									
Media			59,80	32,87	18995	249,00	273,20	1755	A
DE			5,87	6,78	539	46,06	128,86	73	
Valor máximo			71,57	40,92	19825	304,72	473,07	1825	
Valor mínimo			54,47	19,32	18125	145,57	101,57	1600	
Espinass (n = 10)									
Media			21,00	20,30	7665	11,07	83,21	1500	
DE			3,66	4,46	436	1,72	32,29	88	
Valor máximo			24,92	31,20	8225	14,35	147,10	1700	
Valor mínimo			11,75	15,67	6850	7,90	23,75	1400	
Playa La Vila²									
<i>Paracentrotus</i>									
Placas (n = 10)									
Media			2,20	8,62	17605	5,40	7,32	1502	A
DE			0,22	1,62	1098	0,85	4,03	141	
Valor máximo			2,45	11,87	19150	6,22	18,45	1675	
Valor mínimo			1,80	7,25	16050	4,32	2,85	1300	
Espinass (n = 10)									
Media			2,20	6,94	6675	0,56	3,02	1210	
DE			0,23	0,31	452	0,10	1,34	53	
Valor máximo			2,62	7,40	7350	0,75	5,35	1300	
Valor mínimo			1,92	6,50	6125	0,45	1,32	1150	
Bahía de Portman¹									
<i>Citharus Linguatula</i>	0,088	0,002	4,05	3,09					IEO
<i>Pomadasys Bennetti</i>	0,030	0,002	0,98	4,97					IEO
<i>Lithognatus mormyrus</i>	0,014	0,003	2,18	5,71					IEO
<i>Scorpaena porcus</i>	0,078	0,007	1,46	3,22					IEO
<i>Sphraena Sphyaena</i>	0,051	0,002	1,35	3,46					IEO
<i>Umbrina cirrosa</i>	0,018	0,002	2,63	4,32					IEO
<i>Octopus vulgaris</i>	0,018	0,021	15,60	8,60					IEO
Media	0,042	0,006	4,04	4,61					
Valor máximo	0,088	0,021	15,60	8,60					
Valor mínimo	0,014	0,002	0,98	3,09					

¹Bahía de Portman: muestreo en lugar contaminado. ²Playa La Vila: muestreo en lugar no contaminado por minería. Autores: **A**: Auernheimer, (1997); **IEO**: Instituto Español de Oceanografía, (1984).



Arbacia lixula (erizo negro)



Scorpaena porcus



Lithognathus mormyrus



Sphyraena sphyraena



Paracentrotus lividus (erizo rojo)



Umbrina cirrosa



Citharus linguatula



Octopus vulgaris



Pomadasys bennetti

Foto 7.14. Imágenes de las especies, en que se analiza la concentración de metales, que se relacionan en las Tablas 7.14 y 7.15.

En las espinas del erizo negro se observa que el contenido de Fe, Mn y Pb es un orden de magnitud mayor en la bahía de Portman que en la playa la Vila, similar a lo que

ocurre en las placas. En el caso del Zn, la concentración es el doble en Portman. En el Mg y Sr, el valor es similar en ambos casos (Tabla 7.15).

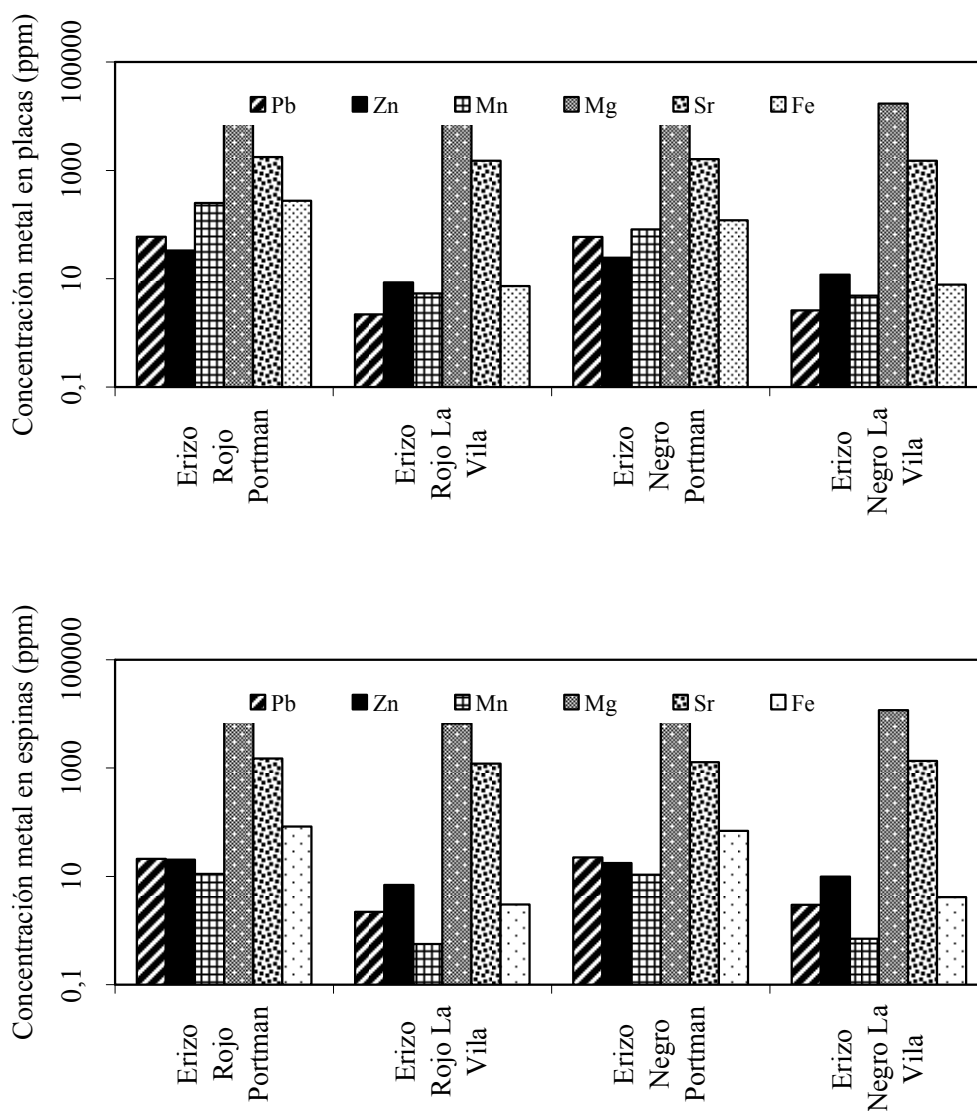


Figura 7.33 Concentración de metales en dos variedades de erizo. **a)** En las placa. **b)** en las espinas (Elaborada con datos de la Tabla 7.14 y 7.15).

Tabla 7.15. Comparación de elementos contenidos (ppm) en *Arbacia lixula* (erizo negro) de la Bahía de Portman y Playa La Vila. (Auernheimer, 1997).

	Pb	Zn	Mg	Mn	Fe	Sr
Bahía de Portman¹						
<i>Arbacia</i>						
Placas (n = 10)						
Media	59,13	24,35	17355	81,92	119,70	1612
Desviación estándar	13,18	4,44	513	20,02	81,77	32
Valor máximo	69,20	30,42	18250	115,15	283,72	1675
Valor mínimo	51,85	17,95	16325	52,75	33,22	1575
Espinass (n = 10)						
Media	22,39	17,56	10995	10,72	69,04	1277
Desviación estándar	3,18	3,47	598	2,52	53,71	81
Valor máximo	28,22	26,27	11900	13,40	220,27	1400
Valor mínimo	19,42	12,85	9750	8,15	11,32	1125
Playa La Vila²						
<i>Arbacia</i>						
Placas (n = 10)						
Media	2,60	11,84	17068	4,89	7,78	1496
Desviación estándar	0,15	2,87	888	2,13	2,46	123
Valor máximo	2,87	18,90	18600	9,32	12,20	1650
Valor mínimo	2,42	9,30	15950	2,27	3,47	1325
Espinass (n = 10)						
Media	2,98	9,89	11681	0,70	4,15	1362
Desviación estándar	0,50	0,99	879	0,09	1,18	133
Valor máximo	4,02	12,02	13050	0,85	6,35	1550
Valor mínimo	2,25	9,20	10675	0,57	1,85	1225

¹Bahía de Portman: muestreo en lugar contaminado. ²Playa La Vila: muestreo en lugar no contaminado por minería.

La concentración de Cd y Pb en la *Culerpa prolifera* en el Mediterráneo (Tabla 7.16) es casi un orden de magnitud inferior a la del Mar Menor (Tabla 7.9). En el caso del Zn, la concentración es 4 veces menor. Para el mercurio, la concentración es mayor en el Mediterráneo. En la *Cymodocea nodosa* la concentración de Zn y Cd son mayores en el Mediterráneo. En ambos metales las mayores concentraciones se encuentran en las hojas. Para el plomo la concentración es mayor en el Mar Menor que en el Mediterráneo.

Tabla 7.16. Metales pesados (ppm) contenidos en las macrofitas del Mediterráneo (Sanchiz, 2000).

			Hg	Cd	Pb	Zn
Posidonia oceanica	La Manga	raiz	26,79	0,83	8,93	40,82
		rizoma	10,71	0,67	6,14	24,49
		hojas	16,07	4,50	31,23	194,29
		Media	17,86	2,00	15,43	86,53
Cymodocea nodosa	La Manga	Raiz	10,50	0,27	5,96	12,19
		Rizoma	< 7,2	0,29	6,51	19,44
		Hojas	45,60	0,43	6,51	22,24
		Media	8,85	0,28	6,235	15,815
Caulerpa prolifera	La Manga	rhizoids + stolons	14,88	0,07	4,49	7,64
		Fronds	13,20	0,05	5,55	8,32
		Media	14,04	0,06	5,02	7,98

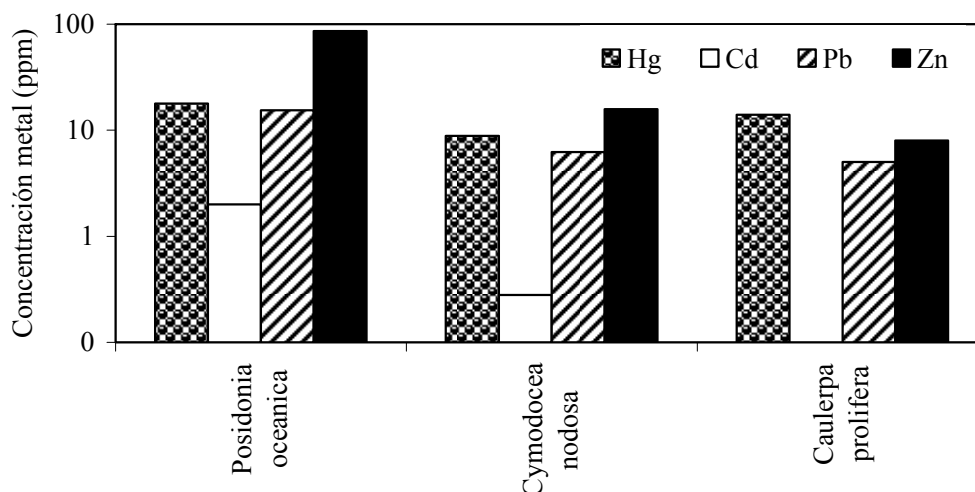


Figura 7.34. Valores medios de la concentración de metales pesados (ppm) en macrophytas (Elaborada con datos de la Tabla 7.16).

7.3. IMPACTO SOBRE EL PAISAJE

El impacto paisajístico de las explotaciones mineras es ampliamente conocido, debido a que se constata a simple vista. Se puede apreciar desde varias carreteras, como la que une Cartagena con La Unión y el Llano del Beal; la del Llano del Beal con Atamaría; La Unión a Portman; en la autovía Cartagena-La Manga.

Las explotaciones mineras a cielo abierto han dado lugar a huecos, cortas y depósitos de estériles (que forman verdaderas montañas artificiales) (ver Capítulo 4), que como ya se ha dicho, constituye uno de los elementos de mayor intrusión en el entorno, provocando cambios en las características visuales de la zona, produciendo cambios fisiográficos, y alteraciones en la calidad paisajística debido a la introducción de colores, texturas y formas discordantes con las del entorno natural. Lo anteriormente descrito supone una pérdida de las condiciones ambientales originales (pérdida de vegetación, contraste estructural y modificación del relieve).

El área total afectada directamente por las actividades minero-metalúrgicas de la zona de estudio es del orden de 50 km², aunque se pueden superar los 100 km² con las áreas más próximas que han sufrido un impacto ambiental indirecto. En la Foto 7.15 se puede apreciar una vista panorámica de la magnitud de este impacto visual, que presenta una gran variedad cromática, con distintas tonalidades de colores azulados, grises y ocres que se corresponde con zonas afectadas y degradadas por las actividades mineras y metalúrgicas. En la Foto 7.16 aparecen las ruinas de una instalación minera, de las que existen en la Sierra Minera un gran número en similares condiciones.



Foto 7.15. En primer plano los vacíos de estériles de la corta Brunita, de tonos grises y azulados. Al fondo el Cabezo Rajao.

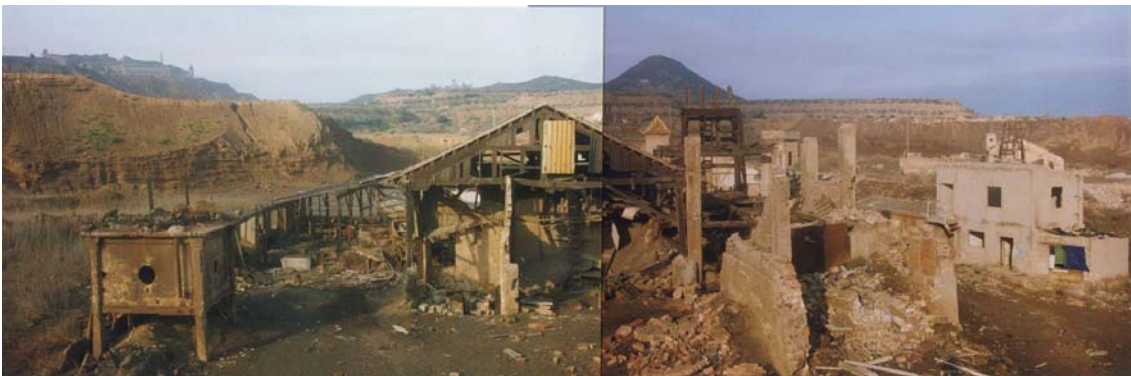


Foto 7.16. Ruinas del lavadero de la mina San Lorenzo, rodeadas por las balsas de lodos de flotación.

Como elemento más significativo de impacto paisajístico, destacan las acumulaciones superficiales de estériles (vacíos) con ausencia total de vegetación, que dan la apariencia de una zona devastada por la actividad humana (Foto 7.15).

7.4. IMPACTO AMBIENTAL A LA ATMOSFERA

El impacto sobre la atmósfera constituye uno de los aspectos más significativos. El proceso que más provoca esta contaminación es la erosión eólica, que está favorecida por las características del viento, las áreas desforestadas y otros factores que se caracterizan a continuación.

El proceso de erosión eólica se desarrolla fundamentalmente en las balsas de lodos de flotación, por presentar ausencia de vegetación, una granulometría fina (limo-arcilla, ver Capítulo 5), pendientes muy marcadas, así como la formación de costras de sulfatos,

producto de la oxidación de los sulfuros existentes en su composición (ver Capítulos 5 y 6).

El proceso de oxidación de los sulfuros y formación de las costras, constituye un fenómeno complejo. Se desarrolla en todos los residuos mineros que lo contengan, como cortas, pozos, galerías y en zonas donde afloran minerales sulfurosos. Hay que señalar que el proceso es más importante en los lodos de flotación, presentando varios ciclos al año, en función de los intervalos de las precipitaciones. El proceso de formación de las costras, en las balsas de lodos de flotación, se trata de explicar a continuación, mediante un modelo conceptual simplificado (Figura 7.35), que consta de tres etapas fundamentales de formación y una de erosión.

I) Durante el episodio lluvioso, si este tiene cierta intensidad, se produce el lavado de las costras de sulfatos existentes en la superficie de las balsas de lodos y la saturación de los residuos por la infiltración de las aguas a través del medio poroso, las grietas de desecación, los planos de estratificación y la existencia de piping (Foto 7.17), así como cambios de nivel del terreno (zonas endorreicas) (Foto 7.18) y de troncos de madera podridos en los taludes de las balsas (Foto 7.19). Una vez desarrollado el proceso de saturación de los lodos, se inicia un nuevo ciclo de formación de las costras de sulfatos (Figura 7.35).

II) El agua contenida en los poros de los residuos asciende por capilaridad, debido a la baja porosidad de estos materiales, hacia la superficie. Motivado por la intensidad de la evaporación (ETP entre 800-1000 mm y ETR entre 250-350 mm) que se desarrolla en el área (Capítulo 2, Tabla 2.2), el agua se evapora y las sales precipitan. Estos sulfatos, que precipitan en superficie, pueden ser insolubles o altamente solubles en agua (Tabla 7.17). En el proceso inicial de formación se encuentran en fase hidratada (Figura 7.35).

Tabla 7.17. Relación de minerales del grupo de los sulfatos que aparecen en la Sierra Minera.

	Especie o grupo mineral	Fórmula química
Sulfatos insolubles	Grupo de la Jarosita	$KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$
	Grupo de la Alunita	$KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$
	Yeso/anhidrita	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
	Anglesita	$PbSO_4$
Sulfatos solubles	Grupo Copiapita	$FeFe_4(SO_4)_6(OH)_2 \cdot 20H_2O$
	Grupo Halotriquita	$FeAl_2(SO_4)_4 \cdot 22H_2O$
	Bianchita	$ZnSO_4 \cdot 6H_2O$
	Melanterita	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$
	Goslarita	$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$
	Epsomita	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$
	Ferrohexahidrita	$FeSO_4 \cdot 6H_2O$

III) En la medida que disminuye el aporte de agua capilar, se produce un proceso de secado y deshidratación de los minerales que han precipitado. Este material se transforma en un polvo muy fino, de baja densidad, que es fácilmente erosionable por el viento (Figura 7.35).

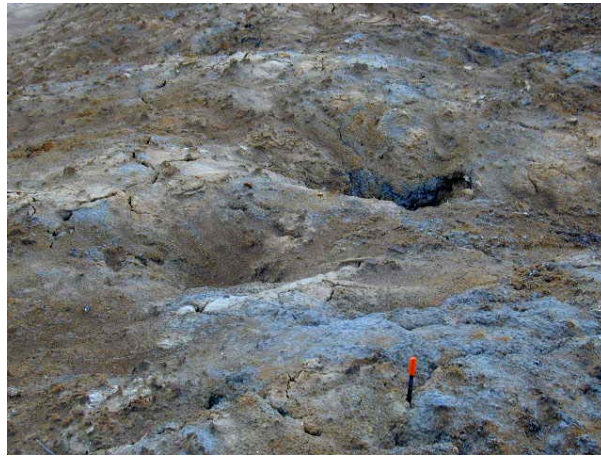


Foto 7.17. Piping en la balsa de lodos Brunita.



Foto 7.18 a) y b). Zonas con encharcamiento de agua dentro de la balsa de lodos del Lirio.



Foto 7.19. Troncos de madera podridos en el talud de la balsa que servían de dique para mantener el lodo.

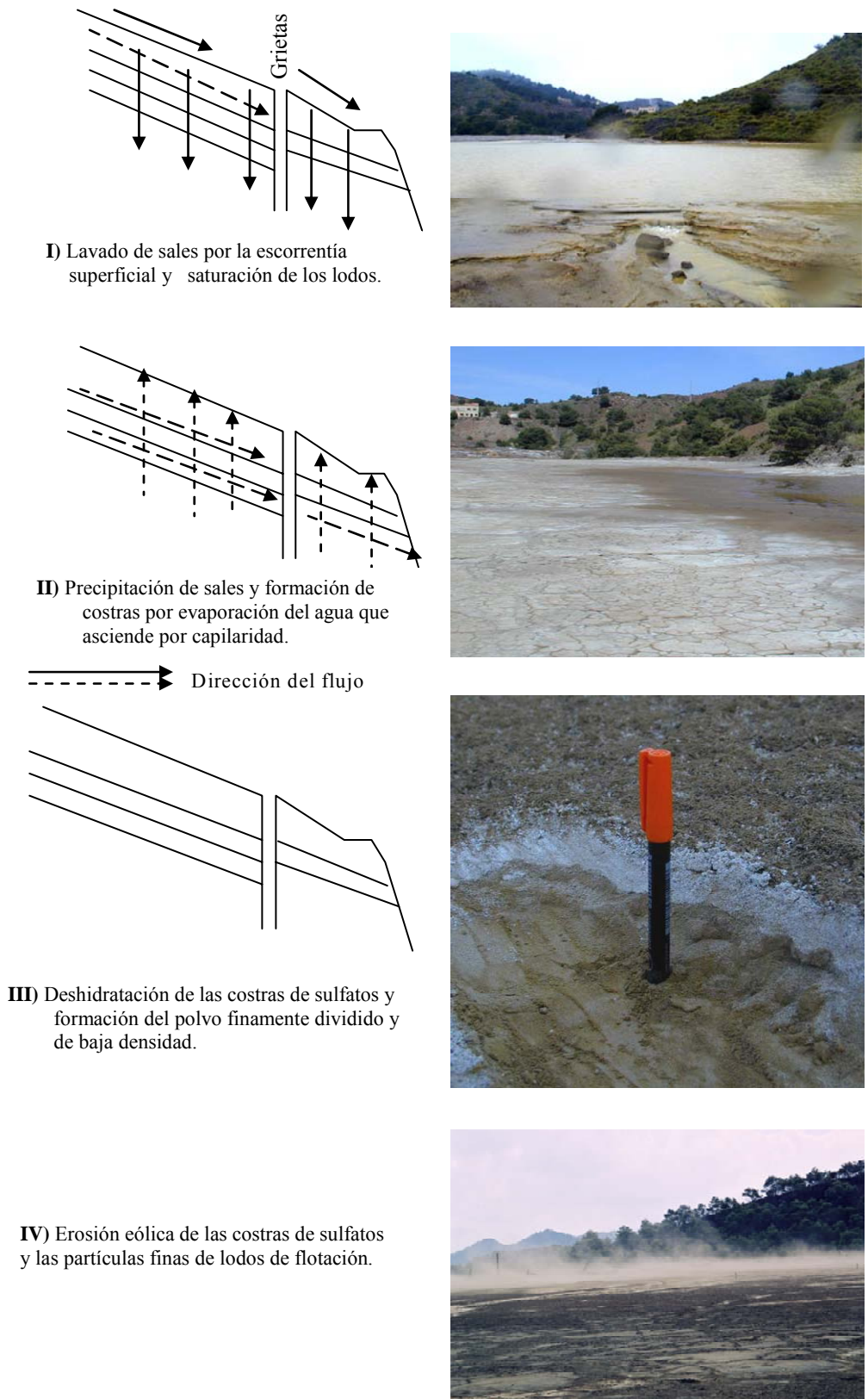


Figura 7.35. Modelo conceptual de formación de las costras de sulfatos y su erosión eólica.

El efecto contaminante sobre la atmósfera, del transporte de partículas sólidas, provenientes de la erosión eólica en las balsas de lodos, se ha evaluado realizando el análisis de 27 muestras de agua de lluvia de dos estaciones pluviométricas (ver Capítulo 6). La estación de Cabo de Palos se encuentra a 9 km de distancia de la zona afectada por la minería, y la del Algar a 2 km, y a 13,2 km de distancia entre sí (ver Capítulo 2, Figura 2.4), donde se han registrado la presencia de altas concentraciones de metales (Pb, Cd, Ni, Zn, Cu) (Capítulo 6, Tabla 6.1) y de sulfatos. En el Capítulo 6, Figura 6.2, se puede apreciar que cuando se produce una lluvia en tres días consecutivos, la concentración de los metales desciende rápidamente, manteniendo unos niveles muy similares en el segundo y tercer día.

Cuando el viento adquiere la suficiente intensidad, se generan nubes de polvo (Figura 7.35) debido al arrastre de partículas en áreas desforestadas, en las escombreras de estériles y, sobre todo, en las balsas de lodos de flotación desprovistas de cubierta vegetal.

7.5. DISCUSIÓN

Si se observa detenidamente la Foto 7.1, se puede apreciar el área que ha sufrido un impacto directo por el desarrollo de las actividades minero-metalúrgicas de la SM y el almacenamiento y vertido de los residuos generados por esta. Con el objetivo de confirmar esta observación visual se ha desarrollado un perfil longitudinal a través de la Rambla del Beal (Figura 7.36, 7.37, 7.38 y 7.39). En este perfil se han representado los diferentes valores de la concentración de los metales Pb, Zn, Cd y Cu existentes en las muestras de residuos tomadas en las escombreras almacenados en la cabecera de la Rambla del Beal (Figura 7.12), sedimentos de las ramblas (Figura 7.10), muestras de suelos (Figura 7.1 a 7.7) y los sedimentos en la orilla del Mar Menor (Tabla 7.4), pues estos son los principales contaminantes detectados en el suelo, sedimentos en la rambla, sedimentos marinos, agua y en la flora y la fauna del área estudiada.

En el caso de los cuatro metales se puede observar que los rangos de concentración detectados en suelos y sedimentos son parecidos a los de los residuos existentes en cabecera de la rambla El Beal (Figura 7.36 a 7.39). Esta similitud constituye un indicativo de que el origen de los metales presentes en el suelo, sedimentos de la rambla y del Mar Menor tienen un mismo origen, el aporte de sedimentos que desarrolla la escorrentía superficial desde la cabecera de la rambla El Beal hasta el Mar Menor. En los cuatro metales se aprecia que la concentración decrece en el último km, lo que puede estar motivado por la existencia de un pH (Figura 7.36 a 7.39) muy elevado en la zona de inundación de las ramblas y una elevada salinidad del agua por la presencia de agua de mar o debido a la alta evaporación de la zona, es de señalar que en estas zona de pantano se desarrollan especies de plantas típicas de un ambiente hipersalino.

En el caso del plomo se puede apreciar que la concentración en los sedimentos de la rambla es ligeramente mayor que la del resto de las muestras de suelos, residuos y sedimentos marinos, esto es debido a que los sedimentos analizados son los que presentan una granulometría fina y que son los transportados mayoritariamente por el agua y a ellos generalmente se asocian los metales pesados (Figura 7.36). En el caso del Zn se aprecia en los sedimentos un comportamiento más irregular pero con valores dentro del rango de concentración de los residuos, la diferencia puede estar marcada por el hecho de que el Zn presenta una movilidad geoquímica mayor que el Pb, sobre todo en los rangos de pH ácido medidos en los sedimentos de la rambla El Beal (Figura 7.37). Para el Cd se observa que la concentración en varias muestras de suelos se encuentra en el rango de los residuos mineros o puede en muchos casos ser menor (Figura 7.38). En el Cu la concentración en los suelos es siempre similar a la de los residuos y los sedimentos del Mar Menor (Figura 7.39).

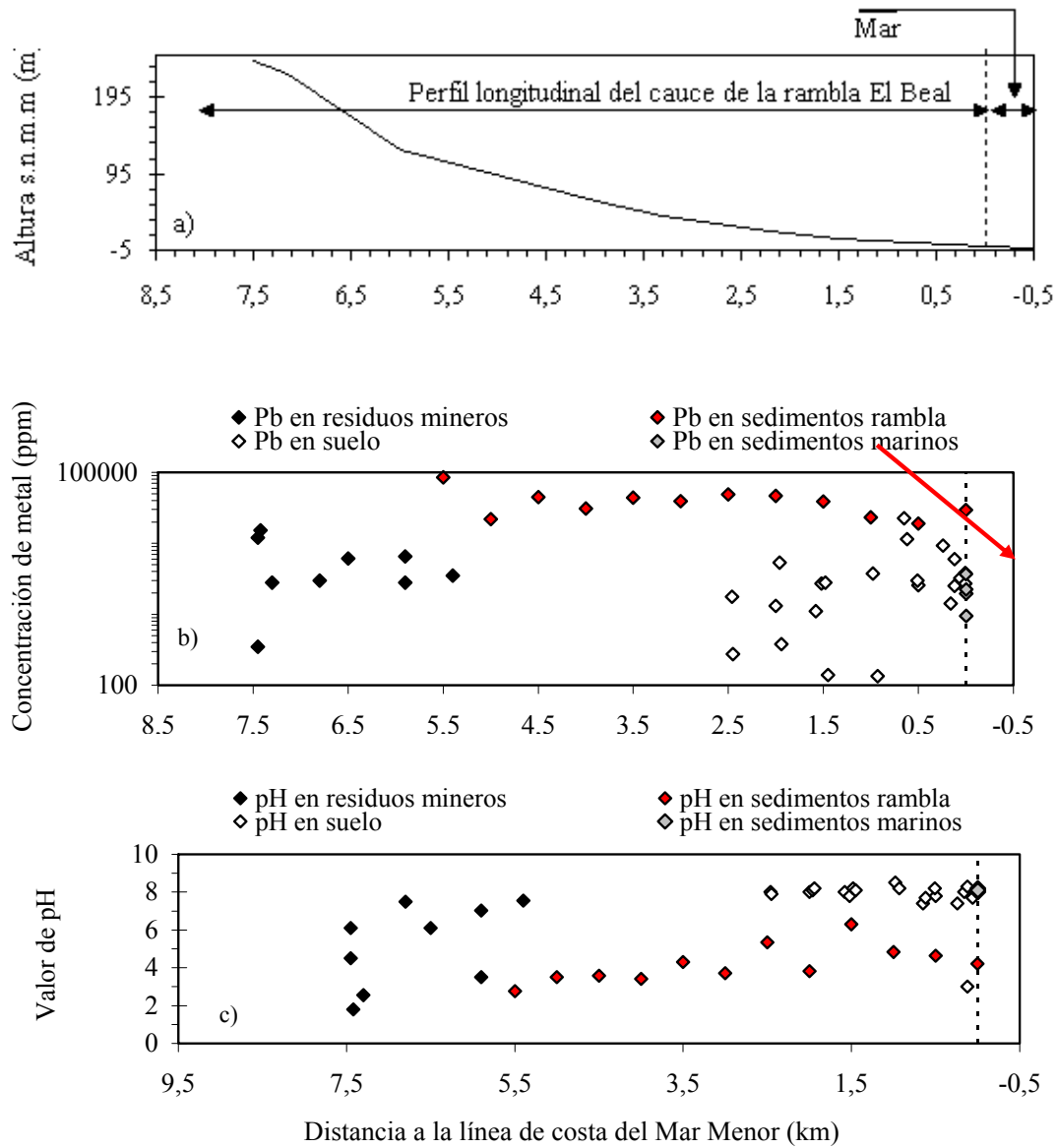


Figura 7.36. Distribución longitudinal del Pb en un perfil a través de la rambla El Beal y la línea de costa del Mar Menor. a) Perfil topográfico. b) Concentración de Pb en los diferentes materiales. c) Valores de pH.

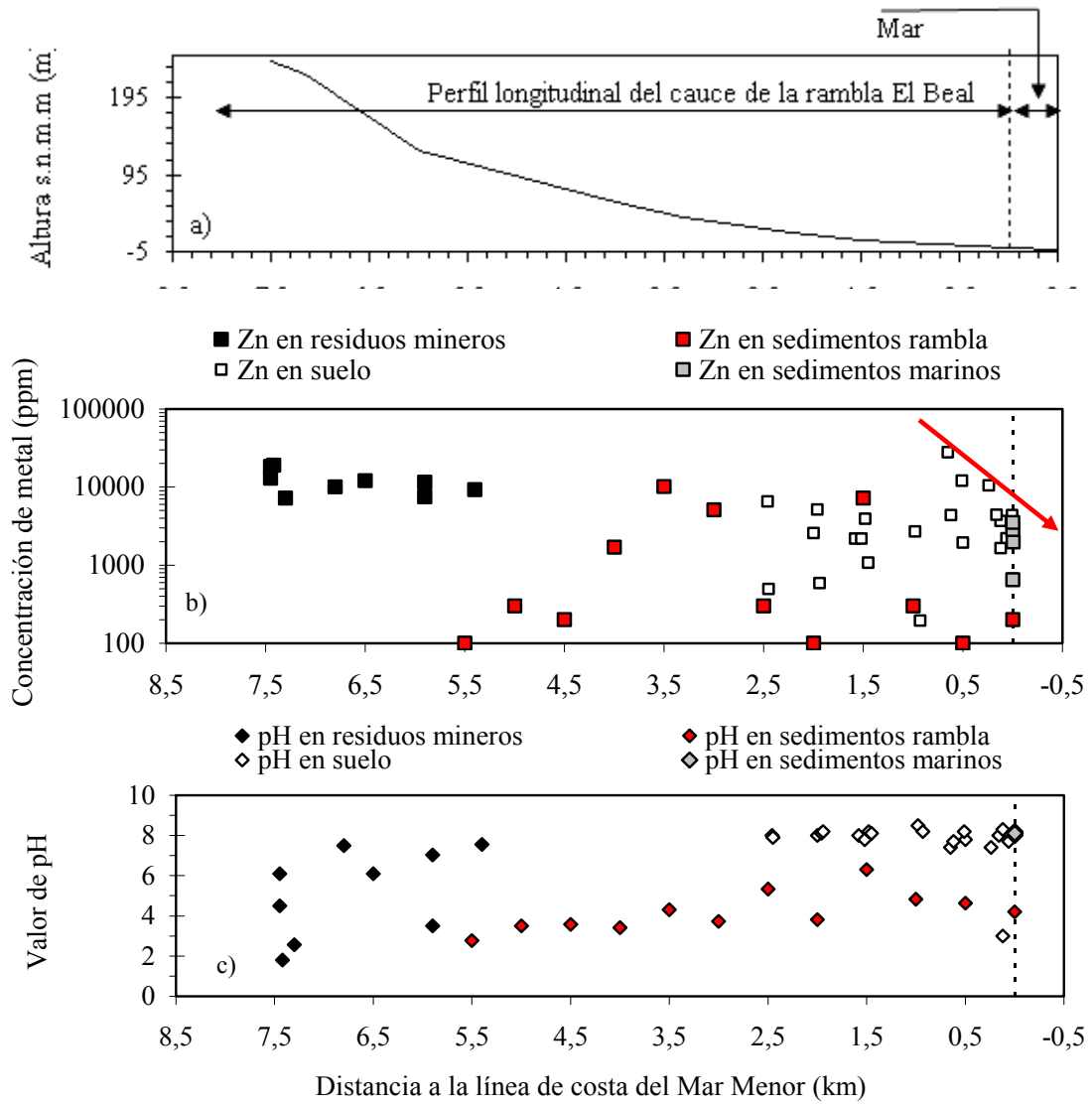


Figura 7.37. Distribución longitudinal del Zn en un perfil a través de la rambla El Beal y la línea de costa del Mar Menor. a) Perfil topográfico. b) Concentración de Zn en los diferentes materiales. c) Valores de pH.

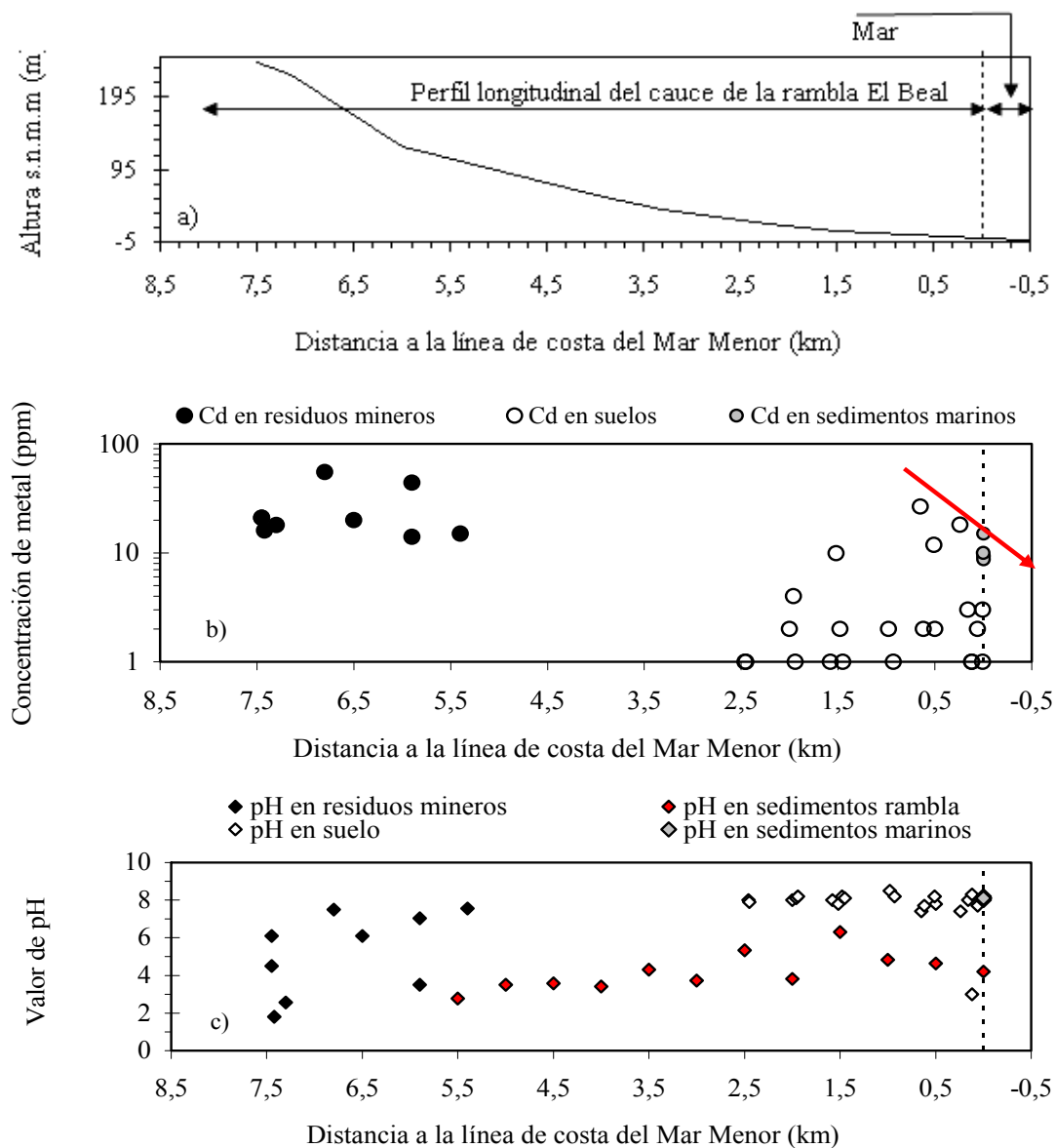


Figura 7.38. Distribución longitudinal del Cd en un perfil a través de la rambla El Beal y la línea de costa del Mar Menor. a) Perfil topográfico. b) Concentración de Cd en los diferentes materiales. c) Valores de pH.

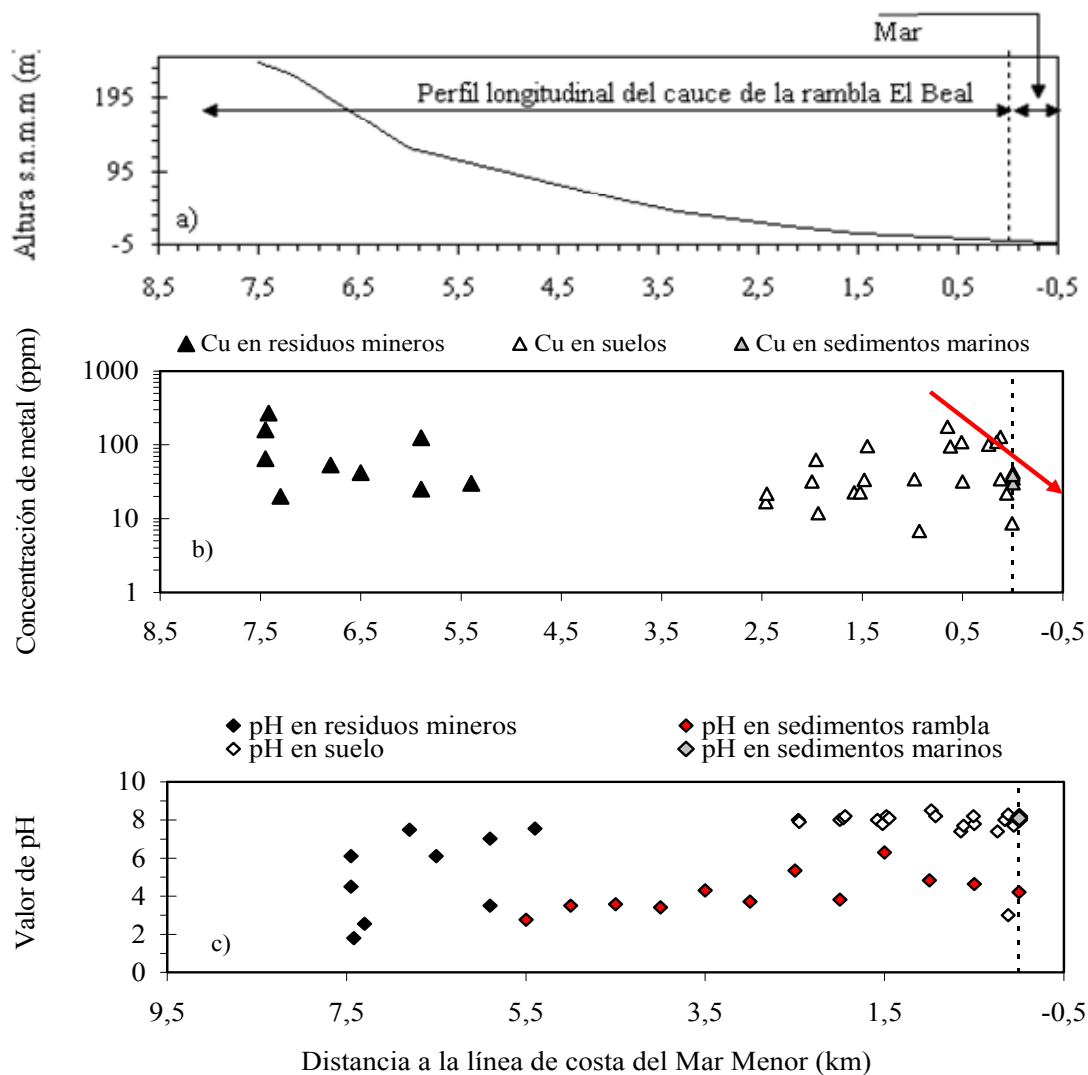


Figura 7.39. Distribución longitudinal del Cu en un perfil a través de la rambla El Beal y la línea de costa del Mar Menor. a) Perfil topográfico. b) Concentración de Cu en los diferentes materiales. c) Valores de pH.

Si se realiza un análisis de la información existente y la obtenida en este trabajo, se pueden establecer las áreas de mayor impacto ambiental de la Sierra Minera y su radio de influencia. En la Figura 7.40 se han distinguido dos zonas:

a) La Zona I denominada de “impacto directo” que ocupa una extensión de 83,67 km² y comprende:

- Zona del Castillo de San Julián definida por un grupo de pozos, ocupa 2,44 km².
- Zona denominada Llano-La Unión-Portman: ocupa la parte central de la Sierra Minera y en ella se concentran la mayor parte de las estructuras mineras inventariadas, las reservas de mineral, las áreas de minería subterránea, el litoral del Mar Mediterráneo afectado en la zona de estudio (bahías del Portman y

Gorguel) y las zonas de inundación de ribera de las ramblas que desembocan en el Mar Menor. Ocupa una superficie aproximada de 78,84 km².

- Zona de Cala Reona ocupada por un grupo de pozos mineros, con una extensión de 2,39 km² aproximadamente.

b) Zona II denominada de “impacto indirecto”, comprende el Mar Menor y la parte del litoral del Mar Mediterráneo que se extiende aproximadamente desde el Cabo Negrete al Cabo de Palos. Se estima una ocupación del orden de 145 km².

CAPITULO 8. RIESGO AMBIENTAL

CAPITULO 8. RIESGO AMBIENTAL

8.1. RIESGO POR EROSIÓN EÓLICA

La intensidad de los vientos (ver Capítulo 2, Tabla 2.3) en la zona de estudio es un factor que determina el riesgo por erosión eólica, el cual afecta a todas las áreas desprovistas de vegetación, entre los que se encuentran los aproximadamente 11 km² ocupados por los residuos minero-metalúrgicos y cortas (ver Capítulo 4, Tabla 4.6).

La erosión eólica afecta principalmente a los 2 km² ocupados por las balsas de lodos de flotación, debido a su fina granulometría (ver Capítulo 5, Figura 5.5) y al proceso de oxidación de los sulfuros en sulfatos. Estos forman unas costras de muy baja densidad que se erosionan por el viento y, a veces, pueden ser transportados a grandes distancias. Es de señalar que este proceso es un ciclo que se repite varias veces al año, pero el efecto más notorio se produce en los meses de verano, donde la deshidratación de las costras es total (Figura 7.5). En las Fotos 8.1 y 8.2 se observan partículas de lodos, ricas en sulfatos, depositadas encima de suelo natural. Su origen proviene de la erosión de la balsa El Lírio.



Foto 8.1. Acumulación de 50 cm. de sedimentos transportados por el viento. El color claro se debe a la alta concentración de sulfatos >60%. Balsa El Lírio.



Foto 8.2. Igual a la Foto anterior, pero la capa de sedimentos es de poca potencia (5 cm.).

8.2. RIESGO POR EROSIÓN HÍDRICA

La erosión producida por el agua de lluvia y la escorrentía superficial, sobre los depósitos de residuos mineros, da lugar a la formación de cárcavas de diferentes magnitudes. En la Foto 8.3 se aprecia, en una escombrera de estéril de gravimetría, el desarrollo de este proceso de una manera muy intensa. En la base de la misma, se muestra un jalón (de color rojo y blanco) que muestra la magnitud del proceso. La profundidad de las cárcavas supera un metro y el ancho variable entre 0,5 y 2 m.



Foto 8.3. Cárcavas producidas por efecto de la erosión hídrica en una escombrera de gravimetría de 2ª Paz, al sur del Llano del Beal. Para tener una idea de la magnitud del proceso, obsérvese el jalón de un metro de altura.

Este proceso erosivo constituye un riesgo, por ser la principal causa de aporte de sedimentos, altamente contaminantes para las aguas superficiales y el medio marino, principalmente del Mar Menor y el litoral del Mediterráneo en el área de estudio. En la Foto 8.4 se observa, tras un episodio de lluvia, la acumulación de detritus gruesos, arrancados de la base de los depósitos de residuos de la rambla del Beal. Los más finos terminarán acumulándose en el Mar Menor.



Foto 8.4. Acumulación de cantos arrancados de la base de los depósitos de residuos de la cuenca de la rambla del Beal.

Una muestra del efecto de los procesos erosivos y la acumulación de sedimentos es la formación de “Punta Lengua de Vaca” en el Mar Menor, en la desembocadura de la rambla La Carrasquilla (Figura 8.1 y Fotos 8.5 y 8.6). Estos sedimentos presentan características texturales y composición química similar a los lodos de flotación (ver Capítulo 5). Los elementos químicos cuantificados han sido Cd, Pb, Zn, Mn y Cu.

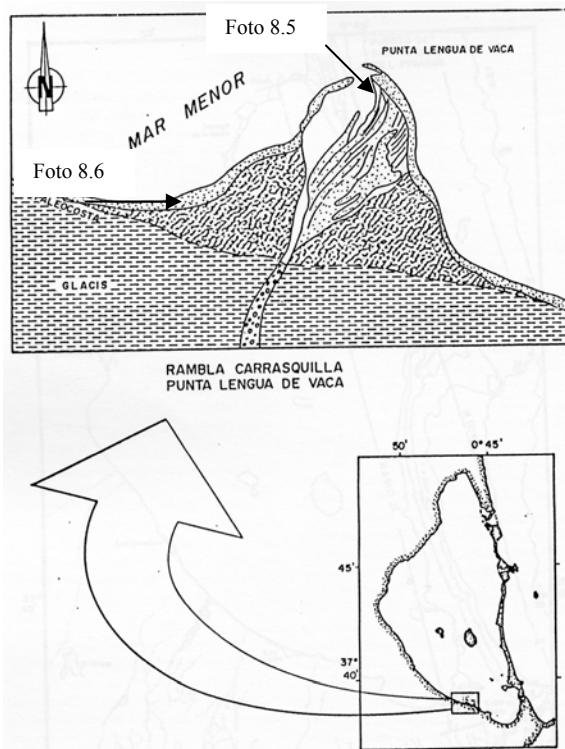


Figura 8.1. Abanico deposicional originado en la desembocadura de la rambla de La Carrasquilla, y que constituye la punta de la Lengua de la Vaca (Díaz del Río, 1993).



Foto 8.5. Abanico deposicional en la desembocadura de la Lengua de la Vaca.



Foto 8.6. Acumulación de lodos de flotación a orillas del mar, en la punta Lengua de la Vaca. (Los Nietos, Cartagena).

La punta Lengua de Vaca es un abanico en cuya formación han influido los materiales sueltos originados por la intensa acción de las explotaciones mineras que, en conjunto con la dinámica del lagoon, continúa siendo activa por el drenaje irregular que posee su cauce.

8.2.1. CUANTIFICACIÓN DE LA TASA DE EROSIÓN

Para estimar la magnitud de la erosión hídrica, se han instalado 6 parcelas experimentales en la balsa de lodos de flotación “Rosa” (García et al., 2004 b) (Foto 8.7), en la que se ha podido cuantificar la tasa de erosión por unidad de área, para un evento de lluvia de $60,5 \text{ l/m}^2$, que representa la quinta parte de la lluvia anual (Tabla 8.1).



Foto 8.7. Parcela experimental en la balsa de lodos de flotación. “Rosa”.

De acuerdo a los valores medidos, se ha estimado la tasa de erosión en $2,14 \text{ kg/m}^2$.

Tabla 8.1. Determinación de la tasa de erosión en la balsa de lodos de flotación denominada “Rosa” (García et al., 2004 b).

Estación El Algar. Precipitación el 15-04-03 = $60,5 \text{ l/m}^2$				Fecha de muestreo 04/06/04	
Parcela	A (m^2)	H (cm)	M (kg)	M/A (kg/m^2)	
1	16	0,19	45,24	2,83	
2	14	0,03	9,19	0,66	
3	14	0,02	2,86	0,20	
4	4	0,17	8,96	2,24	
5	4	0,34	17,53	4,38	
6	4	0,19	10,12	2,53	
Media			15,65	2,14	

A = área de la parcela. H = altura de la capa de suelo erosionada. M = masa erosionada. M/A = tasa de erosión.

Extrapolando este dato a las balsas de la cuenca de la rambla La Carrasquilla, a las balsas de las cuencas de las ramblas que desembocan en el Mar Menor, y para el conjunto de las balsas mineras; considerando la hipótesis de que la desnudez (desprotección de cubierta vegetal o mineral) sea del 70% y, que ocurren cinco episodios de lluvia por año; los tonelajes erosionados anuales, son respectivamente: 2270, 12003 y 16328 toneladas (Tabla 8.2).

Si a los tonelajes erosionados se le aplican las leyes de los metales de los estériles de flotación (SMMPE, 1980), de 0,26% para el Pb y 0,63% para el Zn, los tonelajes de metales que habrían sido movilizados serían los indicados en la Tabla 8.2.

Tabla 8.2. Determinación de los tonelajes erosionados, por efecto del agua de lluvia y escorrentía, en las balsas de flotación.

	Superficie Km^2	Tasa erosión	Desnudez (%)	Episodios lluvia/año	Total erosión (t/año)	Pb metal (t)	Zn metal (t)
Rbla Carrasquilla	0,212	2,14	100	5	2270	5,90	14,30
Rblas Mar Menor	1,60	2,14	70	5	12003	31,21	75,62
Conjunto balsas	2,18	2,14	70	5	16328	42,45	102,87

Este proceso erosivo no ha sido interrumpido, por tanto continuará afectando, si no se aplican las medidas correctoras necesarias para su eliminación, que se analizan más adelante (ver Capítulo 9).

8.3. RIESGO SÍSMICO

8.3.1. EN ZONAS DE MINERÍA SUBTERRÁNEA

Este riesgo está condicionado por la actividad sísmica de la Región de Murcia, donde se han registrado diferentes sismos de intensidad variable entre 2-6 en la escala de Richter (Capítulo 2, Figura 2.21). Este riesgo se acentúa por la existencia de minas subterráneas en combinación con actividad sísmica.

Las zonas de explotaciones subterráneas de la Sierra Minera pueden ser consideradas como de riesgo sísmico, si se tiene en cuenta que las mineralizaciones explotadas siguen con frecuencia zonas de fracturación a distintas profundidades, y algunas de esas fracturas parecen tener cierta actividad sismotectónica. Pequeñas vibraciones transmitidas por las fallas a los pilares, generalmente muy explotados, que sostienen las cámaras subterráneas, pueden producir colapsos y repercutir en subsidencias en la superficie.

En la Sierra Minera se ha estudiado un caso de subsidencia minera en relación con un seísmo (Rodríguez et al., 1999 y 2002b). La zona en cuestión está situada al Oeste de la ciudad de La Unión (Figura 8.2), próxima a la intersección de las fallas regionales de “Cartagena-La Unión”, de dirección N70E, y de “Las Lajas-La Cierva”, de dirección N130-140E. En la Figura 8.3 se muestran dos cortes geológicos, uno de dirección aproximadamente paralela a la falla Cartagena-La Unión (corte 1-1’), y otro perpendicular a la misma (corte 2-2’). Sobre estos cortes se ha señalado la zona de subsidencia, los minados conocidos por planos antiguos y los sondeos existentes.

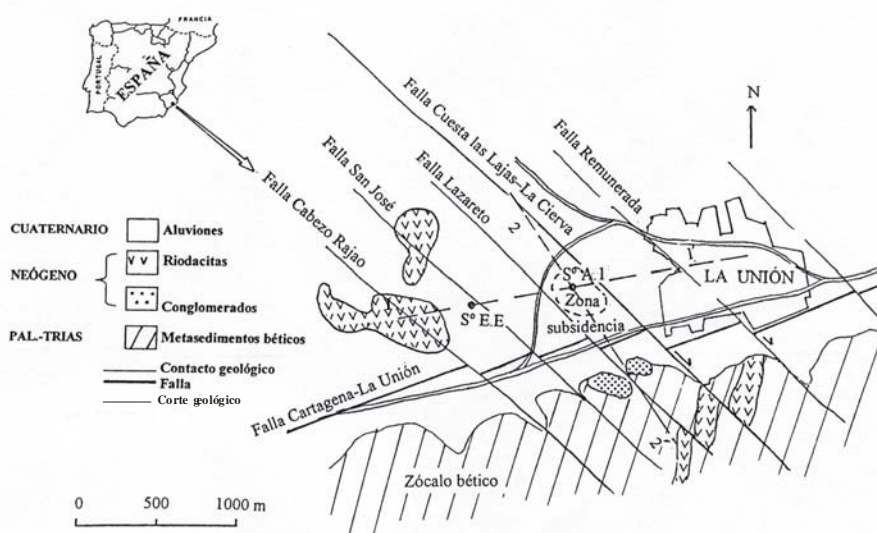


Figura 8.2. Esquema geológico y situación de los perfiles que se muestran en la Figura 8.3 (Rodríguez et al., 2002b).

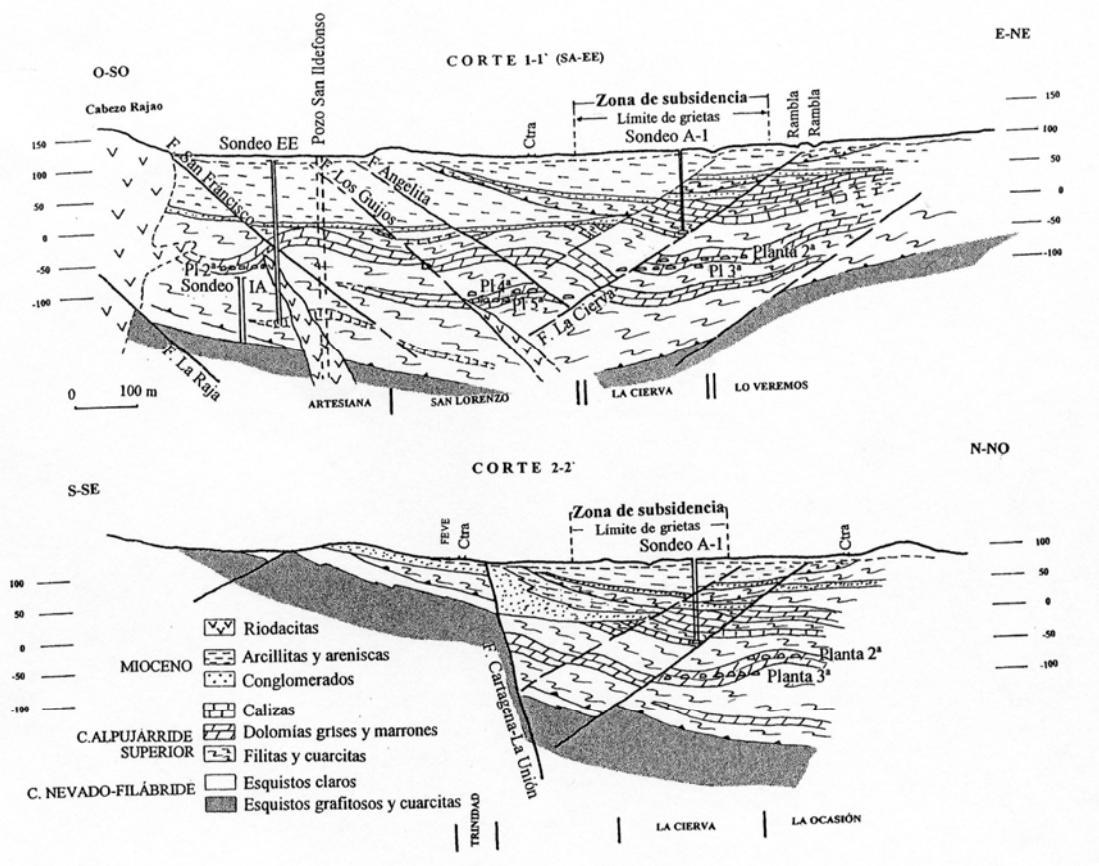


Figura 8.3. Perfiles geológicos (marcados en la Figura 8.2) con la situación de los sondeos y minas subterráneas (Rodríguez et al., 2002b).

La falla Las Lajas-La Cierva, que muy probablemente podría enlazar con la falla del río Segura (Vega Alta) que pasa por Murcia o ser una paralela y próxima a ésta, es de carácter de desgarre dextral y presenta características claramente neotectónicas; como lo confirma el hecho de su incidencia en la geomorfología del litoral (desplazamiento del cabo Negrete hacia el sur, en relación con el cabo de la Galera); además, existen en la zona de falla, pequeñas fracturas paralelas a la principal, que afectan a los caliches del Cuaternario (ver Capítulo 2).

La falla anterior es un accidente sismotectónico de tercer orden (Ibargüen y Rodríguez, 1996); esto viene apoyado por la existencia de epicentros sísmicos a lo largo de su traza entre los que destacan por su proximidad a la zona de estudio, uno al oeste de La Unión y otro al oeste de Torre Pacheco (Figura 8.4).

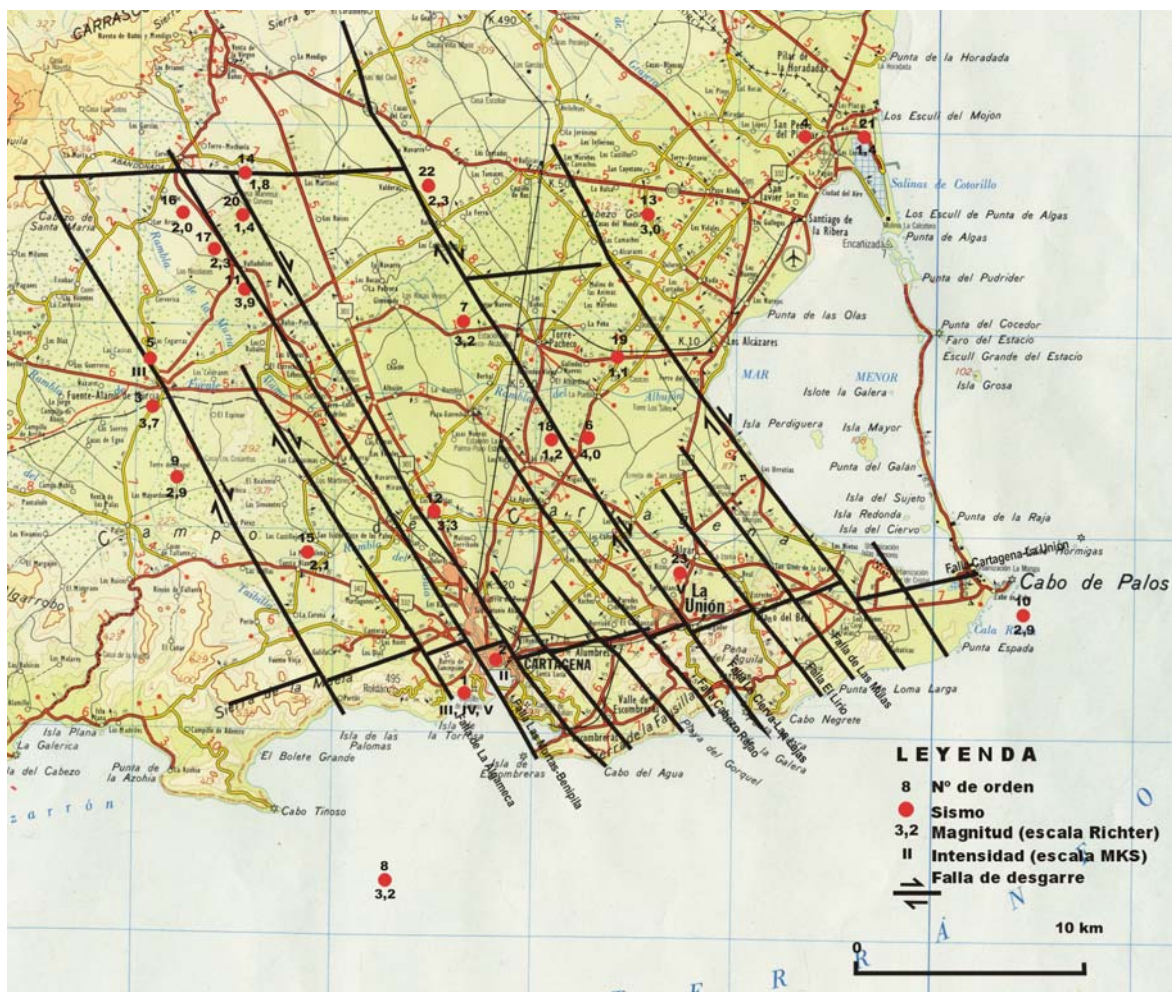


Figura 8.4. Mapa sismotectónico del Campo y Sierra de Cartagena-La Unión. Elaborado con datos del IGN (Manteca et al., 2004b). Base cartográfica original a escala 1:200.000.

El primero de ellos corresponde al sismo que tuvo lugar el 1 de noviembre de 1960, según un trabajo ITGE, (1993b), con intensidad V y el segundo al del 2 de mayo de 1998 con magnitud 2,3. Las isosistas del sismo de 1960 (ver Capítulo 2, Figura 2.22) presentan una forma alargada según dirección N130-140E, la misma que presenta la falla La Cierva-Las Lajas.

Los últimos sismos registrados en la Región de Murcia (Torres de Cotillas en 1995, Ramonete en 1996 y Mula en 1999) tienen un mecanismo focal de desgarre dextral de dirección N140E (Ibargüen y Rodríguez, 1999). No se ha podido determinar el mecanismo focal del sismo ocurrido el 2 de mayo de 1998 en las proximidades de Torre Pacheco, por presentar una magnitud baja, pero muy posiblemente debe corresponder al mismo tipo de cinemática.

La zona afectada de 96.000 m² (Figuras 8.2 y 8.3), se localiza sobre la vertical de las explotaciones mineras de las concesiones La Cierva y Lo Veremos, precisamente donde existe una mayor densidad de minados, habiéndose medido sobre plano tasas de

vacíos que van del 57,36% al 87,46%, siendo su valor medio ponderado del 67,70% (Rodríguez et al., 2002b).

La planta de explotación más alta, de la que se tiene constancia en planos, es la 2ª, de cota de piso -75 m s.n.m., y que se encuentra a unos 170 m de la superficie. Sin embargo, hay certeza de que por encima de esa cota existen también minados, en relación con niveles mineralizados, aunque no se tengan planos de éstos. Prueba de ello es que el sondeo A-1 (Figura 8.3) se paró en una galería a los 133 m de profundidad, a la cota -38 m s.n.m.; pero incluso a menos profundidad deben existir explotaciones; de hecho entre los 60 y 100 m (cotas absolutas $+35$ a -5 m s.n.m.) se considera que pueden existir importantes labores mineras. Además, se conoce la existencia de hundimientos de labores antiguas coincidiendo con la zona de falla “Las Lajas-La Cierva”.

El análisis del sondeo A-1 mostró que la recuperación de testigo es casi del 100% en el Mioceno margoso, presentándose la roca muy compacta, de densidad media de $2,52$ g/cm³; este resultado es coherente con otros ensayos realizados en los mismos materiales, veinte años antes, por la empresa minera Peñarroya, en los que el valor medio fue de $2,5$ g/cm³. Estas características indicarían que no ha habido un esponjamiento de los materiales miocénicos suprayacentes, lo cual sugiere que el hundimiento se ha debido producir de forma rápida y masiva, debido al colapso de los pilares que soportan las cámaras de explotación (ver Capítulo 2), y no por un reajuste progresivo.

Dentro de la zona subsidente, existe una zona circular, que coincide con el anillo de grietas, en la que el valor de subsidencia aumenta bruscamente hacia el centro, produciéndose una ruptura de pendiente; esta zona tan definida marcaría el límite del bloque colapsado en profundidad. El límite nororiental de la zona de agrietamientos y subsidencias coincide sensiblemente con la traza superficial de la falla de “Las Lajas-La Cierva”; de ahí que dicho límite sea rectilíneo y no curvo (Figura 8.5).

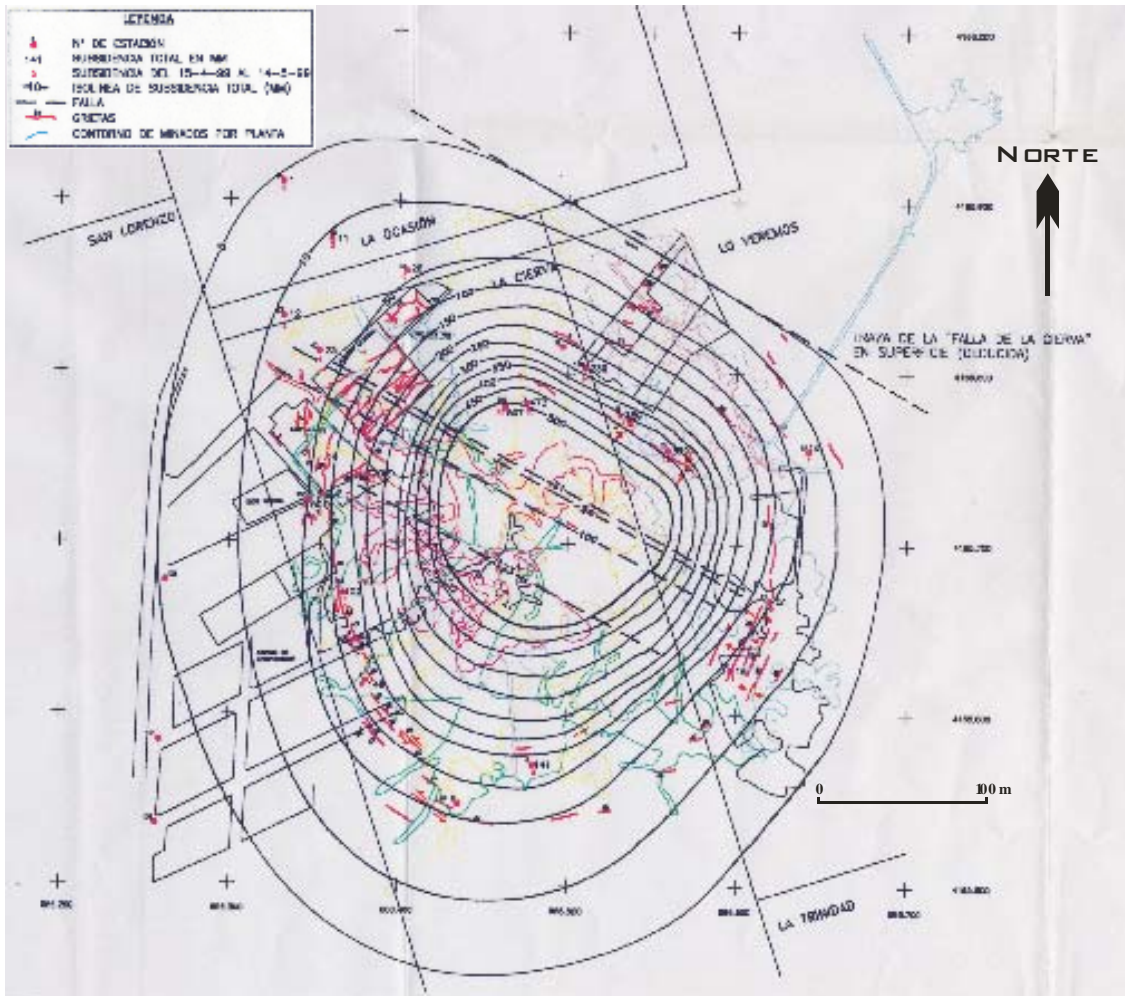


Figura 8.5. Mapa de isosubsistencia. Relación con las minas subterráneas y la falla de “La Cierva”. (Rodríguez et al., 2002b).

Del análisis de la dirección de buzamiento de las grietas se deduce que además de un hundimiento en la vertical, se ha producido un desplazamiento del terreno hacia el NO, como lo prueba la existencia de desgarres sinextrosos compresivos en el borde occidental de la zona afectada, mientras que en el oriental las grietas son abiertas y corresponden a una dinámica tensional. Esta hipótesis, junto con la del hundimiento masivo, resulta coherente con el movimiento de la falla La Cierva-Las Lajas de carácter dextral, en donde el bloque meridional (que es donde se sitúa la zona siniestrada) se desplazaría también hacia el NO.

Existe una gran coincidencia temporal entre la ocurrencia del sismo del 2 de mayo de 1998 (18 h 19 min.) y la aparición de grietas (Fotos 8.8 y 8.9) y subsidencia, que según los habitantes del lugar comenzaron a observarse en la madrugada del día siguiente.



Foto 8.8. Grieta nº 38 localizada frente a las Casas de la mina La Cierva. Obsérvese la amplitud de la misma en relación con el martillo.



Foto 8.9. Grieta nº 35, decimétrica, en el porche interior de la nave de “Sondeos Cabezos”.

La zona de mayor subsidencia (medida) de forma alargada, coincide aproximadamente en superficie con la proyección de la traza de la falla “La Cierva”, correspondiente a las cotas -100 y -80 (Figura 8.5). Esto podría interpretarse como que han sido las explotaciones mineras que se encuentran a estas cotas las que fundamentalmente se han hundido, aunque también lo hayan hecho las superiores a éstas. La subsidencia mayor medida por el Servicio de Cartografía de la C.A.R.M., se ha registrado en la nave Comet, con un valor de 507 mm (Figura 8.6) en un año de observación (desde junio 1998 a mayo 1999). Ésta continuaba, en esa última fecha, a razón de un máximo de 23 mm/mes. De acuerdo con los valores que se muestran en la Figura 8.6 parece que se ha iniciado el proceso de reajuste final del terreno, pues en algunos puntos de observación de los bordes ya se había registrado una subsidencia cero.

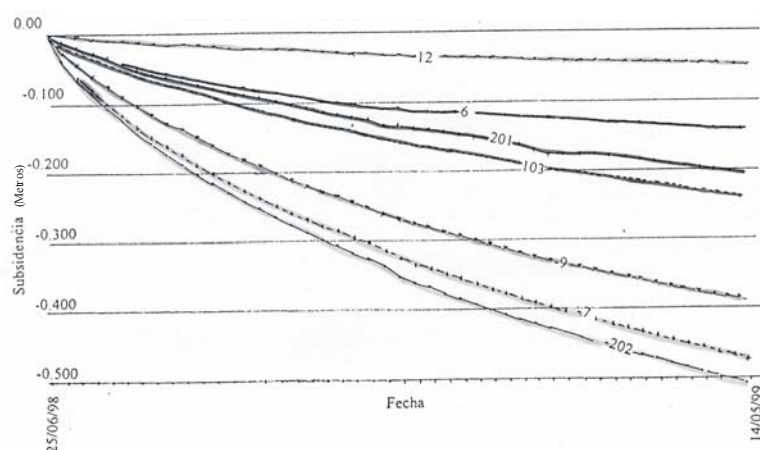


Figura 8.6. Evolución de la subsidencia en diferentes puntos de control. (Mediciones semanales de Junio 1998 a Mayo 1999. Servicio de Cartografía de la C.A.R.M.) (Rodríguez et al., 2002).

El volumen de subsidencia calculado ha sido de 20.810 m³, que equivale aproximadamente al 7,5% de los huecos de las galerías de las minas subterráneas infrayacentes, considerando una altura media de dichos huecos de 4 m (276.859 m³).

Dada la gran concentración de minas subterráneas en la zona de la falla de la Cierva, por tratarse de estructuras mineralizadas muchas de ellas explotadas por el método de cámaras y pilares) con dirección predominante N130-140E, es razonablemente posible que el terremoto, ocurrido el 2 de mayo de 1998, a pesar de que fue de relativamente pequeña intensidad, propagara su energía a través del plano de dicha falla y desencadenara el proceso de colapso por rotura de algún pilar; e inmediatamente después, éste se acentuaría por “efecto dominó”. Hay que considerar que esa zona es la de mayor concentración de minados, con un porcentaje de huecos superior al 80% en las zonas mineralizadas, que se encuentra ya en un estado de equilibrio meta estable y en una fase de degradación tras el abandono de la actividad minera.

En la bibliografía sobre subsidencia minera no se encuentran referencias a la sismicidad como causa de hundimientos, sino más bien al contrario, se asume que los colapsos mineros generan ondas sísmicas. Pero en el caso presente, si el sismo detectado hubiera sido el efecto y no la causa del colapso, el epicentro hubiera estado situado sobre la mina y no a 10 kilómetros más al norte.

En ninguno de los estudios consultados se menciona al factor sismotectónico como un posible efecto desencadenante del proceso de colapso; factor que en este caso, sí merecía ser estudiado, teniendo en cuenta que desde 1995 hasta 1999 tuvo lugar un período de intensificación sísmica en el Sureste de la Península Ibérica, que culminó con el terremoto de Mula, 65 kilómetros al NO de La Unión, de magnitud 5,3 en el año 1999. De ahí que haya sido éste el enfoque que se haya escogido para investigar preferentemente y relacionarlo con la subsidencia.

Las conclusiones derivadas de este caso estudiado fueron las siguientes:

1. El colapso minero y la subsiguiente subsidencia de la mina La Cierva de La Unión (Murcia), cuyos minados se sitúan preferentemente a lo largo de la importante falla de desgarre dextral y de carácter neotectónico, denominada "Las Lajas-La Cierva" (Figuras 8.2 a 8.5), parece haberse desencadenado en relación con la reactivación de dicha falla por un movimiento sísmico de intensidad 2,3 focalizado sobre esa estructura unos 10 kilómetros más al norte.
2. El colapso fue favorecido por el estado de sobreexplotación de la mina, con muy altas tasas de huecos o cámaras muy grandes, por lo que el fallo de pocos pilares, bastaría para desencadenar el proceso observado.

8.3.2. EN RELACIÓN CON LA LICUEFACCIÓN DE BALSAS DE LODOS

El riesgo de licuefacción de los depósitos de lodos de flotación, a consecuencia de la actividad sísmica, ha sido tenido en cuenta al ser estudiado el depósito “El Lírio” (Faz et al., 2003 a y 2004), por las siguientes razones:

- a) Por encontrarse en una zona de intensa fracturación, con predominio de las fracturas de rumbo N130E, una de ellas, denominada El Lírio, pasa por el borde NW-SE del depósito del mismo nombre.
- b) La existencia de filones mineralizados que rellenan fracturas de dirección N130E.
- c) Existencia de galerías subterráneas a distintas profundidades asociadas a la falla El Lírio.
- d) Localización de epicentros sísmicos, muchos de ellos situados en las trazas de las fallas sismo-tectónicas de dirección N130E (Figura 8.4).

El trabajo concluye diciendo que, aunque sobre la falla El Lírio no se ha situado ningún epicentro, eventualmente, aunque con poca probabilidad, podría tener un comportamiento similar y provocar la licuefacción de los lodos allí almacenados.

Por este motivo, habría que estudiar detalladamente cada una de las balsas en relación con la tectónica, y con la cercanía a núcleos de población, para cuantificar el riesgo de licuefacción por efecto sísmico.

8.4. RIESGO POR HUNDIMIENTO EN ZONAS MINERAS DEBIDO A CAUSAS NO SISMOTECTÓNICAS

Las 17 áreas donde se han explotado recursos minerales por el sistema de minería subterránea, por el método de cámaras y pilares son, de Oeste a Este, las siguientes: Cabezo Rajao, La Ocasión, Ampliación a Brunita, Anita, Gloria Barros, Lolita, Balsa y Depositaria, Anghera-Navidad, Sur Tomasa, Sur San Valentín-II, Tábano, Emilia Norte, Buen Consejo, Julio César, Ampliación Los Blancos, El Lirio y Sur Los Blancos-I (ver Capítulo 4, Figura 4.23).

En estas zonas puede ocurrir el proceso de hundimiento o colapso de la superficie debido a que se ha registrado un aumento del nivel freático del agua subterránea, al deterioro de las estructuras mineras y a la posible ocurrencia de un sismo.

En el mapa de recursos (ver Figura 4.22) se han cartografiado las áreas con recursos minerales conocidos de la Sierra, las cuales se sitúan sobre zonas mineras muy explotadas, siendo en éstas donde se podrían producir procesos de hundimiento debido al colapso de cámaras y pilares. Algunos casos de los sucedidos en la Sierra Minera se ilustran en las Fotos 8.10 y 8.11.

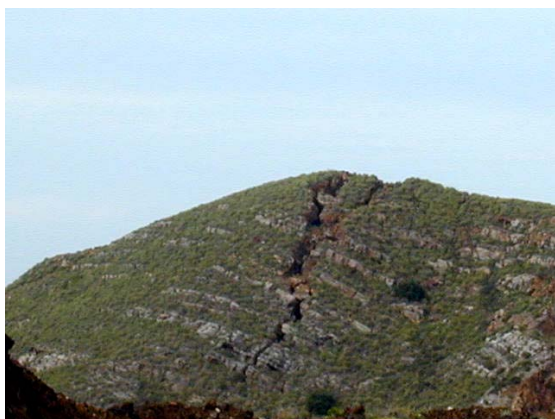


Foto 8.10. Cerro de Don Juan. Corta Emilia.



Foto 8.11. Hundimiento de la mina Remunerada en el año 1970, en las proximidades de la corta San Valentín.

8.5. RIESGO POR COLAPSO DEBIDO A EROSIÓN SUBTERRÁNEA

El riesgo por colapso se puede producir principalmente en uno de los nueve tipos de residuos inventariados: las balsas de lodos. El colapso en las balsas de lodos parece ser que esta producido por el agua que, en su proceso de infiltración arrastra los lodos en suspensión y produce una erosión interna, que acaba creando importantes huecos o “piping”, y provocando el colapso de las masas superiores. Además, el agua que llega a la base del pantano, puede disolver el caliche que hubiera y producir también huecos.

Un ejemplo de este proceso se ha observado en la balsa conocida como Marqués de Pejas, donde se ha cartografiado un colapso circular de aproximadamente 1500 m² (Foto 8.12), que ha provocado el desarrollo de un gran número de grietas (Fotos 8.13, 8.14 y 8.15). Estas grietas, de variadas dimensiones y profundidad superior a 2 m, facilitan la infiltración de las aguas de precipitación y con ellas el aumento de la zona de hundimiento.



Figura 8.12. Colapso producido en la balsa de lodos “Marqués de Pejas”.



Foto 8.13. Efectos del hundimiento sobre los árboles.



Foto 8.14. Grietas sobre el pantano.



Foto 8.15. Detalle de grietas que se unen.

Estos procesos afectan a la vegetación que se desarrolla en la superficie de las balsas, como se puede observar en la Foto 8.13. La magnitud del proceso crece en la medida que se producen diferentes eventos de lluvia. A mayor intensidad de lluvia los procesos erosivos pueden ser mayores.

8.6. RIESGO POR PÉRDIDA DE ESTABILIDAD DE LAS BALSAS

En las balsas de lodos se ha observado la presencia de deslizamientos. El mayor de ellos sucedió en la balsa “Brunita” (Foto 8.16 y 8.17), a las 18,15 h del 20 de octubre de 1972, cuando se encontraba en actividad. Este deslizamiento se produjo a consecuencia de unas lluvias torrenciales (se registraron 237 l/m² entre los días 17, 18 y 19 en la estación de Cabo de Palos; y 119 l/m² en la del Algar), cuya intensidad provocó la fluidez de lodos al superar el rozamiento entre las partículas, venció la escasa resistencia de la pared norte de la balsa, que se encontraba aguas abajo, y tuvo como consecuencia la inundación y enterramiento de la mayor parte del cementerio de La Unión, y la muerte de una persona que se encontraba allí en ese momento.



Foto 8.16. Rotura de la balsa “Brunita” (Foto IGME, 1974b)



Foto 8.17. Detalle de la Foto anterior. Obsérvese la zona del deslizamiento de los lodos (Foto IGME, 1974b).

Naturalmente, en algunos casos este riesgo es mayor por la cercanía de las balsas a núcleos urbanos, tal es el caso de la balsa Jenny, que está situada junto a las primeras viviendas de la población del Llano del Beal. Esto ha motivado la reciente retirada del pantano, por parte de la Administración Regional, pese a su coste económico (\approx 10 millones de euros).

En la zona de estudio no se conocen otros deslizamientos de iguales o parecidas consecuencias. Tan solo se reconocen roturas parciales en algunas balsas, ocurridas después de su abandono, como las que se muestran en las Fotos 8.18 a y b.

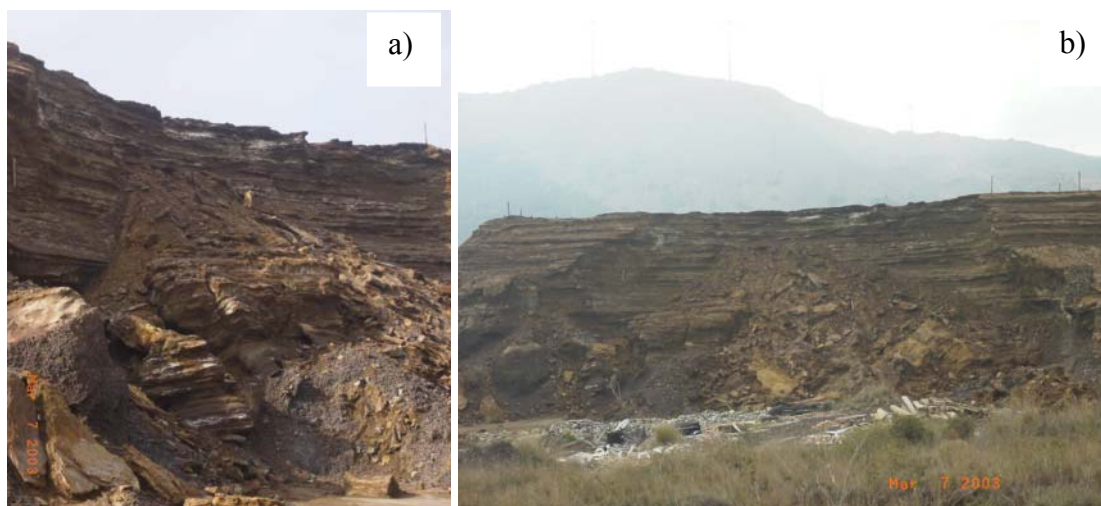


Foto 8.18. a) y b): desplomes en balsas de lodos de flotación.

8.7. RIESGO AMBIENTAL POR LIXIVIADO (PARA EL MEDIO HÍDRICO)

Con el objetivo de estudiar la masa de metales solubles en agua, por ser la primera en incorporarse al medio hídrico, se ha aplicado, a diferentes tipos de residuos, la norma alemana *DIN 38414-S4 (Determination of Leachability by water)* que es una de las más utilizadas en Europa. La solución extractante empleada en los ensayos de extracciones es agua Milli-Q.

El procedimiento de la norma DIN se ha aplicado tres veces consecutivas con una ratio de 1:10 (10 gramos de suelo en 100 mL de agua Milli-Q). El pH inicial del agua Milli-Q es de 5,6 en todos los casos. Es de señalar que el proceso de lixiviado de los residuos de la Sierra Minera, se produce por su contacto con el agua de lluvia, la cual tiene un pH similar o mayor que el del agua Milli-Q empleada en estos ensayos.

Cuando en los resultados del ensayo de un residuo, resulte que la concentración de uno de los metales liberados al medio hídrico, sea superior al límite establecido en la norma, se considera que dicho residuo presenta riesgo para el medio ambiente. En las nueve muestras de residuos ensayados, se puede observar que siete de ellas presentan una liberación al medio acuoso de una masa superior al límite establecido (Tabla 8.3). Las únicas muestras de residuo que no presentan riesgo son la de óxidos “Esmeralda” y la de lodo de flotación “Rosa”. Esto se debe a que son muestras con pH alcalino y en estas condiciones la movilidad de estos metales es prácticamente nula. Sin embargo, la muestra de óxidos “Erizo” cuyos materiales tienen un origen similar a la de “Esmeralda”, sí presenta riesgo ambiental. Por lo que se puede plantear que todos estos residuos presentan cierto riesgo ambiental, por presentar en su interior una determinada masa de metales altamente solubles en agua. En los resultados de los ensayos de lixiviado se puede observar que el pH de la fase sólida condiciona o controla geoquímicamente la masa de metal lixiviada (Figura 8.7)

Tabla 8.3. Concentración de metales en el agua para cada una de las extracciones realizadas (ratio de 1:10 (10 gramos de suelo en 100 mL de agua Milli-Q. Extracciones en agua Milli-Q. La extracción se ha realizado de acuerdo al procedimiento de la norma alemana DIN38414 S4.

1 ^{era} extracción								
Tipo de residuo	Muestra	pH	CE	Pb	Zn	Cd	Cu	Ni
			mS/cm	ppm				
Óxidos	Esmeralda	7,5	1,34	<0,4	<0,1	<0,05	<0,1	<0,4
Óxidos	Erizo	6,5	0,48	<0,4	1,71	<0,05	<0,1	<0,4
Gravimetría	Coto Azul	3,2	1,4	2,254	27,558	0,152	<0,1	<0,4
Estéril de corta	Blancos	6,1	2,6	<0,4	66,128	0,821	<0,1	<0,4
Lodos flotación	Jenny	6,0	2,94	2,352	118,33	0,598	<0,1	<0,4
Lodos flotación	Rosa*	8,2	4255	<0,02	<0,4	<0,007		
Gravimetría	Paz	4,4	4,76	3,553	264,68	2,028	0,129	<0,4
Gacheros	Cielo	5,1	0,15	8,386	10,528	<0,05	<0,1	<0,4
2 ^{da} extracción								
Tipo de residuo	Muestra	pH	CE	Pb	Zn	Cd	Cu	Ni
			mS/cm	ppm				
Óxidos	Esmeralda	7,8	0,51	<0,4	<0,1	<0,05	<0,1	<0,4
Óxidos	Erizo	6,7	0,22	<0,4	0,768	<0,05	<0,1	<0,4
Gravimetría	Azul	3,4	0,43	3,288	4,299	<0,05	<0,1	<0,4
Estéril de corta	Blancos	6,6	0,67	<0,4	5,397	<0,05	<0,1	<0,4
Lodos flotación	Jenny	6,1	2,32	1,682	30,331	0,173	<0,1	<0,4
Lodos Flotación	Rosa*	8,3	2310	<0,02	<0,4	<0,007		
Gravimetría	Paz	4,7	1,46	2,991	46,361	0,371	<0,1	<0,4
Gacheros	Cielo	5,4	0,03	3,812	2,324	<0,05	<0,1	<0,4
3 ^{era} extracción								
Tipo de residuo	Muestra	pH	CE	Pb	Zn	Cd	Cu	Ni
			(mS/cm)	ppm				
Óxidos	Esmeralda	8,0	0,18	<0,4	<0,1	<0,05	<0,1	<0,4
Óxidos	Erizo	6,6	0,14	<0,4	0,459	<0,05	<0,1	<0,4
Gravimetría	Azul	3,4	0,28	5,018	2,056	<0,05	<0,1	<0,4
Estéril de corta	Blancos	7,1	0,25	<0,4	0,622	<0,05	<0,1	<0,4
Lodos flotación	Jenny	6,3	0,75	<0,4	9,597	<0,05	<0,1	<0,4
Lodos flotación	Rosa*	8,3	2110	<0,02	<0,4	<0,007		
Gravimetría	Paz	4,7	0,48	3,261	13,628	0,116	<0,1	<0,4
Gacheros	Cielo	5,5	0,02	2,454	1,102	<0,05	<0,1	<0,4
NL (ppm)		4-13	50*10⁻³	0,5-1,0	2,0-5,0	0,1-0,2	2,0-5,0	0,5-1,0
NIPDWS** (ppm)				0,025	5	0,005	0,005	0,02

NIPDWS** es la concentración máxima permitida para agua potable (R.D. 140/2003). **NL**: límite establecido (* Margui et al., 2004).

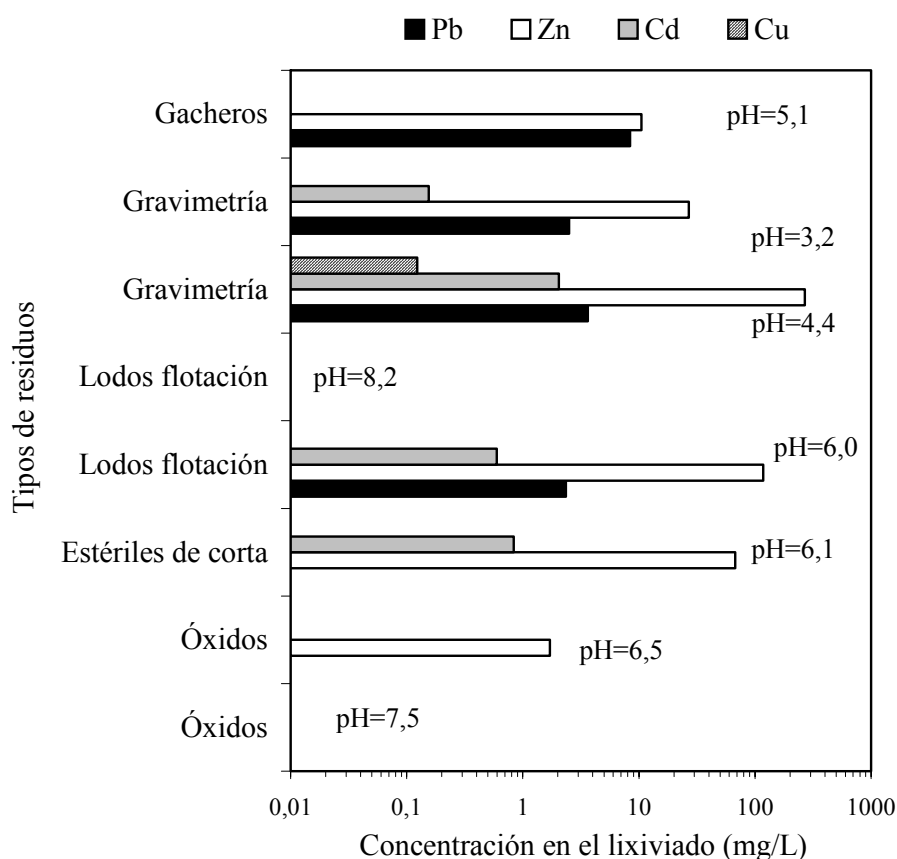


Figura 8.7. Masa de metal lixiviado en diferentes tipos de residuos y el pH de la fase sólida (Elaborada con datos de la Tabla 8.3).

La concentración total de metales en los residuos se determinó por digestión de los residuos con agua regia (ratio 1:3; 3 mL HCL y 1mL HNO₃) al microondas. Aunque con este ataque no se logra en muchos casos la digestión total de las muestras, se puede apreciar en la Tabla 8.4 y Figura 8.8 que en todos los residuos están presentes los principales elementos contaminantes encontrados en las masas de aguas continentales y marinas, así como en los diferentes animales y plantas terrestres y marinas, en los que se han realizado estudios de concentración de metal en diferentes periodos (ver Capítulo 7).

En la Figura 8.8 se puede apreciar como las mayores concentraciones de metales corresponden al Pb y el Zn. En todos los casos la concentración de estos dos elementos es superior en más de un orden de magnitud a la concentración de Cd, Cu y Ni.

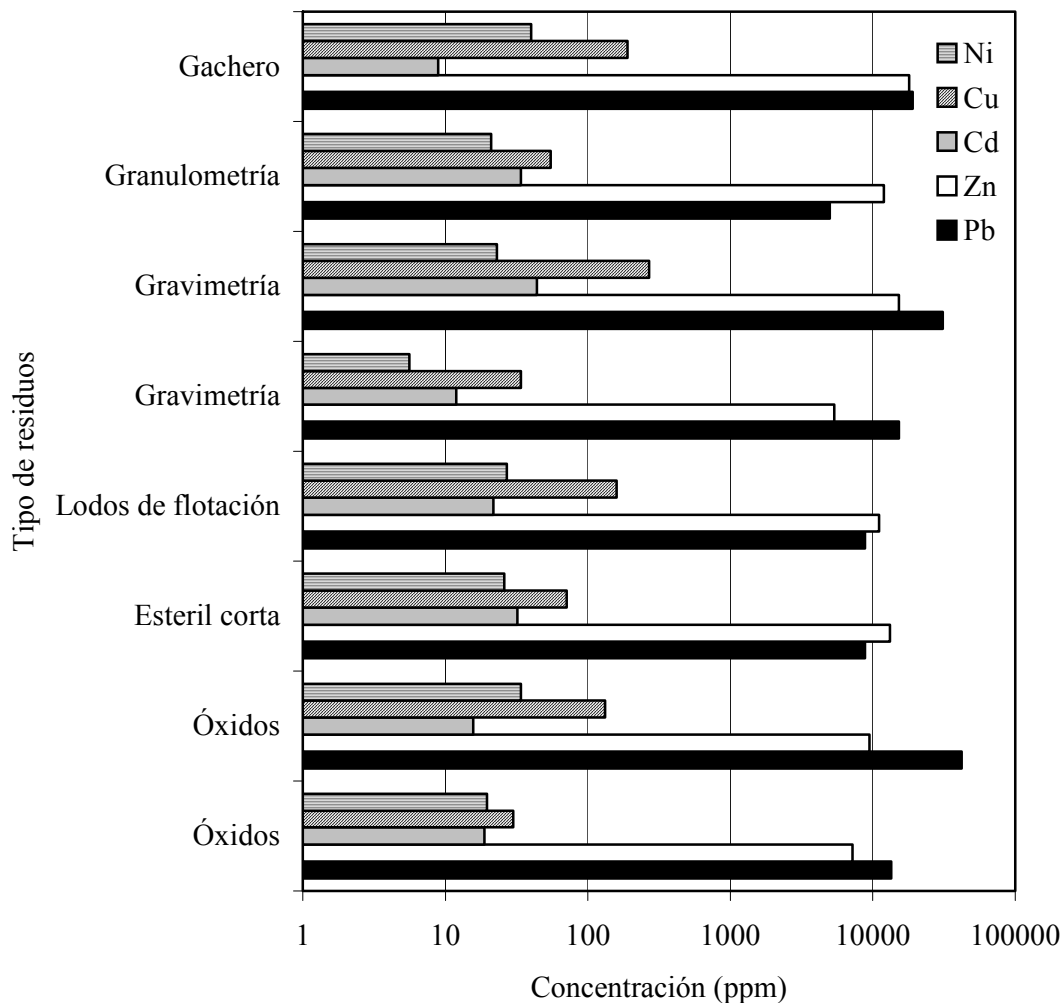


Figura 8.8. Concentración total de metales en diferentes tipos de residuos (Elaborada con datos de la Tabla 8.4).

Tabla 8.4. Determinación de la concentración de metal en el solución extractante resultante del ataque con agua regia (ratio 1:3; 3 mL HCL y 1mL HNO₃) en 8 muestras (de 6 residuos diferentes) de la Sierra de Cartagena-La Unión.

Tipo de residuo	Balsa	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Cd (ppm)	Cu (ppm)	Ni (ppm)
Óxidos	Esmeralda	13500	7200	18,8	30	19,6
Óxidos	Erizo	42000	9500	15,7	132	34
Gravimetría	Coto Azul	15300	5380	12	33,9	5,6
Estéril corta	Blancos	8800	13200	32	71	26
Lodos	Jenny	8800	11100	21,8	159	27
Gravimetría	Paz	31000	15300	44	270	23
Granulometría	Rechazo	5000	12000	34	55	21
Gachero	Cielo	19110	18000	8,9	190	40

8. 8. ANÁLISIS DE METALES EN DOS SONDEOS REALIZADOS EN BALSAS DE LODOS DE FLOTACIÓN

Conjuntamente con los resultados analizados en los diferentes tipos de residuos y, considerando que los que más riesgo ambiental presentan son los lodos de flotación, se realizó el estudio de dos sondeos, con extracción de testigo, en las balsas “El Lirio” y “Brunita”, consideradas como representativas de las existentes en el área. En estos dos sondeos se ha analizado el pH, la conductividad eléctrica y el contenido de metal total, soluble y el bioasimilable.

pH: en la Tabla 8.5 se puede apreciar que el pH de la balsa “El Lirio” es siempre mayor que el de “Brunita”. La diferencia se debe al origen de los lodos acumulados en cada una de las balsas. En la balsa “El Lirio” se acumulan lodos procedentes de la explotación de un depósito de sulfuros de Pb-Zn asociados a margas (rocas con alto contenido de carbonatos), mientras que los de balsa “Brunita” se originan de la explotación del segundo (2º) manto, denominado manto piritoso, por su alto contenido en pirita. La parte superior de la balsa “Brunita” presenta un pH muy ácido, esto se debe a su alto contenido de sulfuros oxidados que generan una costra de sulfatos de varios centímetros en la superficie y que son altamente solubles en agua. En la evolución del pH en profundidad se puede apreciar que su valor es similar en ambas balsas, esto se debe a que los procesos de oxidación de los residuos en profundidad es muy limitado o no tiene lugar, debido a la falta de oxígeno. En ambos casos el valor medido de pH en agua es superior al pH medido en la solución de KCL.

C.E.: la conductividad eléctrica en la parte superficial (0-1 m) es más de dos veces superior en “Brunita” con relación al “Lirio” (Tabla 8.5), debido a que esta balsa posee una gran cantidad de sales en el primer metro, principalmente en los primeros centímetros debido al proceso de oxidación de los diferentes tipos de sulfuros. Se observa que en profundidad, donde no son afectados los sulfuros por los procesos de oxidación, los valores de pH y conductividad presentan menos diferencias, siendo en ocasiones mayores en el “Lirio”.

Tabla 8.5. Conductividad eléctrica y pH en las balsas de lodos “El Lirio” y “Brunita” (Faz et al, 2003 a y b).

	Balsa “El Lirio”				Balsa “Brunita”			
	Profundidad	pH agua	pH KCl	C.E (ds/m)	Profundidad	pH agua	pH KCl	C.E (ds/m)
Residuos mineros	0-1	7,47	7,03	4,27	0-1	4,89	4,84	11,83
	1-2	6,70	6,24	4,90	1-2	6,31	6,16	11,05
	2-3	7,24	6,97	3,76	2-3	6,64	6,35	6,22
	3-4	7,27	7,00	3,26	3-4	6,36*	6,04	4,70
	4-5	7,36	7,27	3,61	4-5	6,55*	6,29*	3,45
	5-6	7,28	7,20	3,39	5-6	6,55*	6,30	2,98
	6-7	7,51	7,06	3,66	6-7	6,57*	6,31	2,76
	7-8	6,92	6,70	5,99	7-8	5,88*	5,63	2,90
	8-9	7,18	6,44	4,21	8-9	5,24*	5,21*	3,31
	9-10	6,88	6,21	4,04	9-10	4,59	4,50	5,06
	10-11	6,36	6,25	6,02	10-11	5,12	4,78	4,04
	11-12	6,41	6,27	5,69	11-12	5,01	4,90	4,91
	12-13	6,60	6,41	4,76	12-13	4,79	4,69	5,87
	13-14	7,13	7,02	5,45	13-14	6,22	6,26	3,38
Sustrato rocoso (1)	14,4	7,78	7,67	3,38	13,8	6,87	6,85	2,51
	14,6	7,89	7,64	3,91	14,0	7,43	7,32	2,47
	14,8	7,71	7,46	4,63	14,8	7,34	7,27	1,83

(1) Sustrato rocoso: El Lirio: Mioceno (margas miocenas). Brunita: UAS (Unidad de Portman, calizas y filitas).

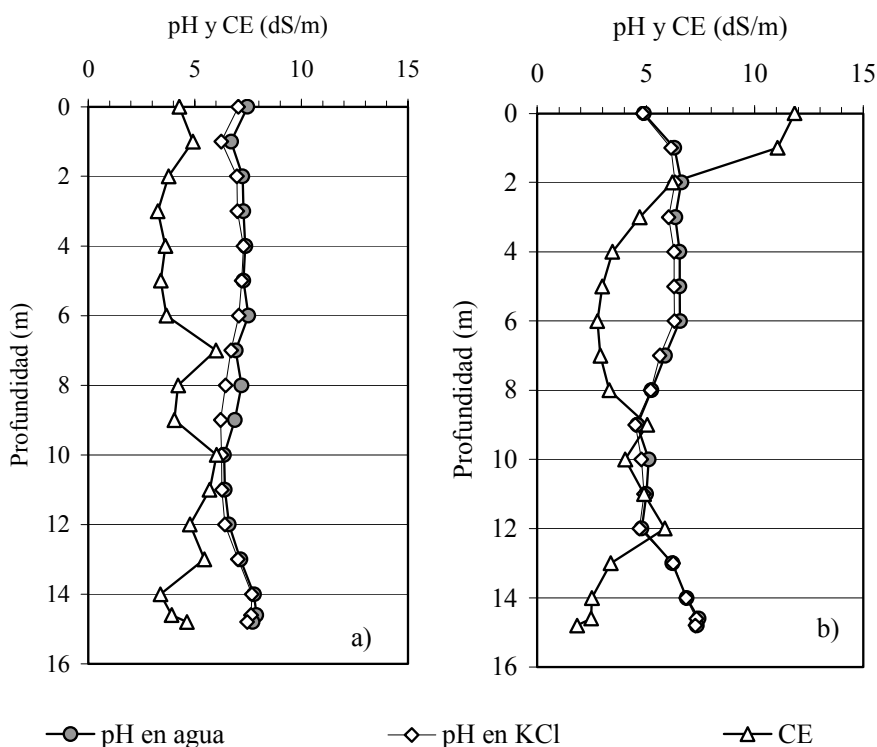


Figura 8.9. Variación de la conductividad eléctrica (CE) y del pH en los sondeos de dos balsas de lodos de flotación, a) El Lirio y b) Brunita (Elaborada con datos de la Tabla 8.5).

Plomo: se puede comprobar en la Tabla 8.6 que la concentración de plomo total en la balsa “El Lirio” es superior a la de “Brunita”. En ambos casos se aprecia que la concentración de Pb bioasimilable es más de dos ordenes de magnitud superior a la del Pb soluble en agua.

Tabla 8.6. Concentración de Pb total, soluble y bioasimilable en los sondeos de las balsas de lodo “El Lirio” y “Brunita” (Faz et al, 2003 a y b).

	Balsa “El Lirio”						Balsa “Brunita”					
	P(m)	Pb(T) (ppm)	Pb(S) (ppm)	% del total	Pb(B) (ppm)	% del total	P(m)	Pb(T) (ppm)	Pb(S) (ppm)	% del total	Pb(B) (ppm)	% del total
Residuo minero	0-1	4095,0	0,79	0,02	417,12	10,19	0-1	2240,0	4,98	0,22	10,55	0,47
	1-2	4810,0	1,49	0,03	871,21	18,11	1-2	1705,0	0,70	0,04	542,80	31,84
	2-3	3716,0	6,59	0,18	902,92	24,30	2-3	2434,0	0,00	0,00	561,60	23,07
	3-4	3567,0	0,71	0,02	908,77	25,48	3-4	1934,0	0,17	0,01	522,90	27,04
	4-5	3516,0	0,50	0,01	847,15	24,09	4-5	4558,0	0,31	0,01	278,70	6,11
	5-6	5001,0	2,07	0,04	1242,08	24,84	5-6	6874,0	0,46	0,01	333,00	4,84
	6-7	5266,0	1,53	0,03	1260,74	23,94	6-7	7687,0	0,64	0,01	435,00	5,66
	7-8	9350,0	3,46	0,04	967,41	10,35	7-8	2265,0	1,78	0,08	501,10	22,12
	8-9	6008,0	1,45	0,02	989,05	16,46	8-9	2439,0	10,37	0,43	319,20	13,09
	9-10	3935,0	1,90	0,05	996,61	25,33	9-10	4555,0	14,28	0,31	914,10	20,07
	10-11	7706,0	4,98	0,06	786,30	10,20	10-11	2963,0	6,30	0,21	666,90	22,51
	11-12	8519,0	4,50	0,05	649,26	7,62	11-12	5884,0	16,28	0,28	886,70	15,07
	12-13	7949,0	1,30	0,02	456,71	5,75	12-13	4242,0	0,00	0,00	790,60	18,64
13-14	5359,0	0,51	0,01	597,01	11,14	13-14	3761,0	0,78	0,02	877,00	23,32	
Sustrato rocoso	14,4	57,5	0,29	0,50	6,84	11,89	13,8	2440,0	0,04	0,00	46,44	1,90
	14,6	59,1	0,30	0,52	8,00	13,55	14,0	729,9	0,00	0,00	52,79	7,23
	14,8	172,4	0,37	0,22	5,30	3,07	14,8	670,6	0,00	0,00	166,30	24,80

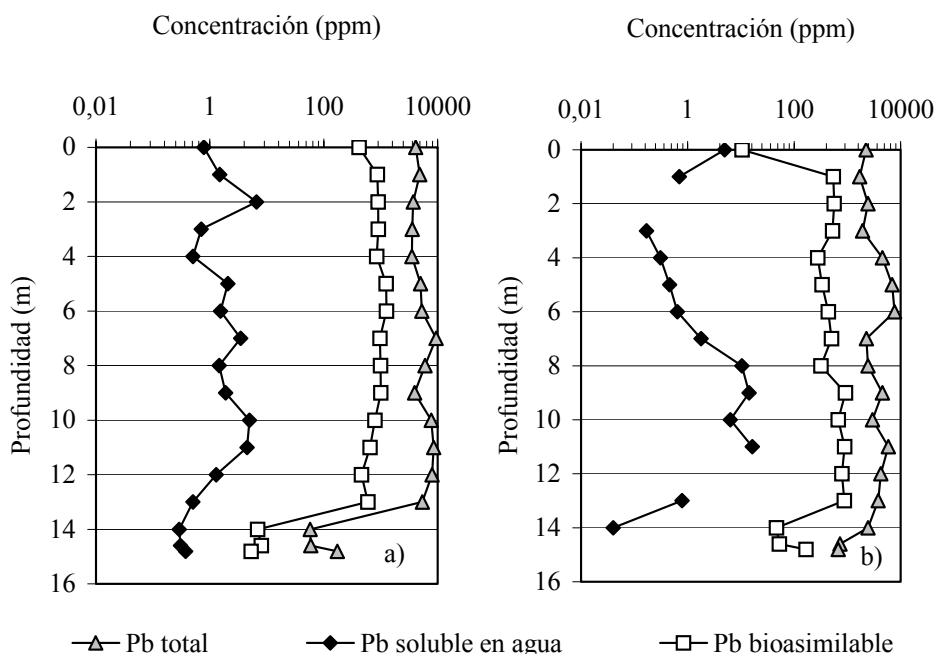


Figura 8.10. Distribución de Pb total, soluble y bioasimilable en los sondeos de dos balsas de lodos de flotación, a) “El Lirio” y b) “Brunita” (Elaborada con datos de la Tabla 8.6).

En el caso del sustrato rocoso se puede apreciar que la concentración de metales es muy baja en ambas balsas, siendo mayor en la base de la balsa “Brunita” que en la de “El Lirio”.

Zinc (Zn): los mayores valores de Zn soluble se encuentran en la parte superior de ambos depósitos de lodos, esta zona es precisamente la que se caracteriza por la presencia de mayor grado de oxidación de los sulfuros (Tabla 8.7). Al igual que en el plomo, la concentración de metal bioasimilable es muy superior a la del soluble, generalmente más de un orden de magnitud (Figura 8.11). La concentración de Zn en la parte baja del sustrato del depósito “Brunita” es más de un orden de magnitud que en el sustrato rocoso de la balsa “El Lirio”.

Tabla 8.7. Concentración de Zn total, soluble y bioasimilable en los sondeos de las balsas de lodo “El Lirio” y “Brunita” (Faz et al, 2003 a y b).

	Balsa “El Lirio”						Balsa “Brunita”					
	P(m)	Zn(T) (ppm)	Zn(S) (ppm)	% del total	Zn(B) (ppm)	% del total	P(m)	Zn(T) (ppm)	Zn(S) (ppm)	% del total	Zn(B) (ppm)	% del total
Residuo minero	0-1	8536,0	5,08	0,06	333,81	3,91	0-1	6084,0	774,30	12,73	288,30	4,74
	1-2	8061,0	17,54	0,22	291,55	3,62	1-2	8060,0	6,73	0,08	116,50	1,45
	2-3	7349,0	5,10	0,07	199,57	2,72	2-3	9999,0	0,00	0,00	51,09	0,51
	3-4	7326,0	4,19	0,06	238,24	3,25	3-4	4943,0	20,81	0,42	183,60	3,71
	4-5	5475,0	2,21	0,04	174,29	3,18	4-5	7315,0	124,30	1,70	253,40	3,46
	5-6	6330,0	1,44	0,02	78,48	1,24	5-6	8330,0	15,63	0,19	265,70	3,19
	6-7	4982,0	1,78	0,04	86,02	1,73	6-7	7692,0	19,55	0,25	232,90	3,03
	7-8	8200,0	21,34	0,26	294,68	3,59	7-8	4107,0	73,25	1,78	164,40	4,00
	8-9	15920,0	7,54	0,05	283,84	1,78	8-9	2835,0	165,00	5,82	235,20	8,30
	9-10	11102,0	8,51	0,08	146,86	1,32	9-10	13358,0	45,48	0,34	43,29	0,32
	10-11	8013,0	23,40	0,29	302,95	3,78	10-11	12890,0	18,67	0,14	18,02	0,14
	11-12	8512,0	23,91	0,28	273,00	3,21	11-12	10009,0	151,38	1,51	148,80	1,49
	12-13	9385,0	19,95	0,21	400,24	4,26	12-13	16068,0	0,00	0,00	204,50	1,27
	13-14	4086,0	2,53	0,06	341,68	8,36	13-14	14131,0	9,14	0,06	239,60	1,70
Sustrato rocoso	14,4	313,8	0,00	0,00	12,02	3,83	14,4	29936,0	0,30	0,00	361,20	1,21
	14,6	230,1	0,00	0,00	9,93	4,31	14,6	5038,0	0,00	0,00	29,69	0,59
	14,8	581,5	0,00	0,00	54,78	9,42	14,8	3999,0	0,00	0,00	160,80	4,02

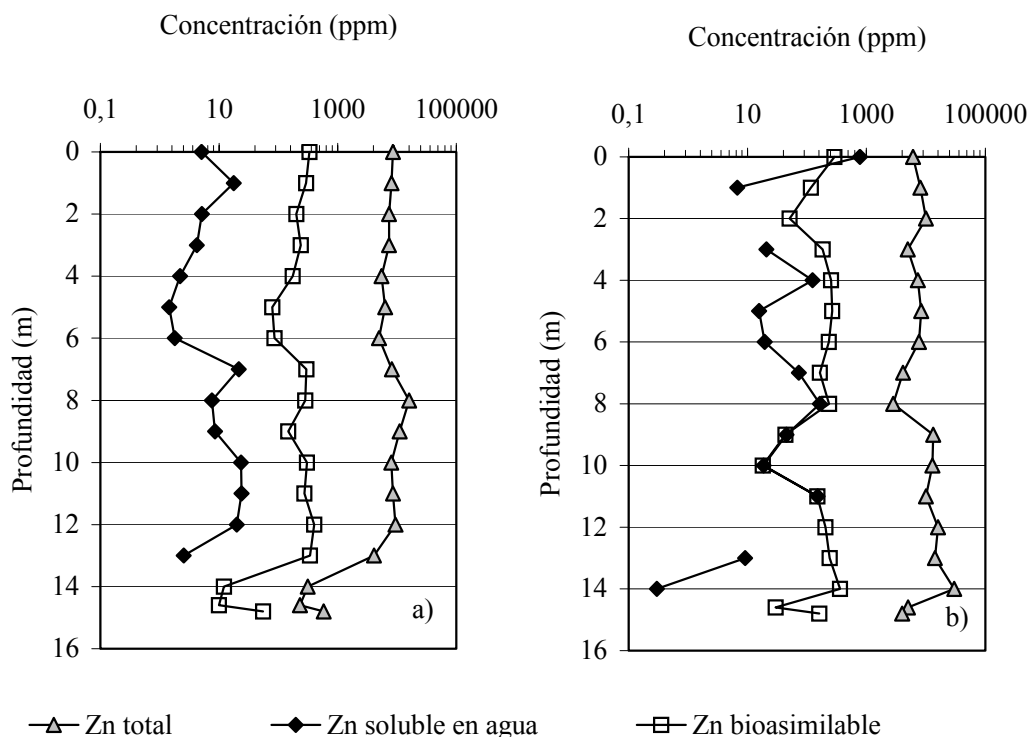


Figura 8.11. Distribución de Zn total, soluble y bioasimilable en los sondeos de dos balsas de lodos de flotación, a) “El Lirio” y b) “Brunita” (Elaborada con datos de la Tabla 8.7).

Cobre (Cu): el cobre total es generalmente mayor en el caso de la balsa “Brunita”, esto es un hecho relacionado con la existencia en esta balsa de mucho más sulfuro de hierro en el que generalmente el Cu se encuentra asociado en forma de calcopirita. La concentración de Cu soluble es muy baja en ambas balsas (Tabla 8.8), mientras que en la de Cu bioasimilable se aprecia una diferencia muy marcada entre ambas balsas, siendo en la de “Brunita” generalmente mayor. En la balsa “El Lirio” el Cu soluble y el bioasimilable solamente se detecto en 4 puntos, uno de ellos en el sustrato rocoso (Figura 8.12).

Tabla 8.8. Concentración de Cu total, soluble y bioasimilable en los sondeos de las balsas de lodos “El Lirio” y ”Brunita” (Faz et al, 2003 a y b).

	Balsa “Lirio”						Balsa “Brunita”					
	P(m)	Cu (T) (ppm)	Cu(S) (ppm)	% del total	Cu(B) (ppm)	% del total	P(m)	Cu(T) (ppm)	Cu(S) (ppm)	% del total	Cu(B) (ppm)	% del total
Residuo minero	0-1	94,2	0,06	0,07	0,07	1,96	0-1	125,7	0,10	0,1	3,54	2,82
	1-2	79,3	0,09	0,11	0,11	1,62	1-2	174,9	0,00	0,0	17,54	10,03
	2-3	56,3	0,00	0,00	0,00	4,97	2-3	142,4	0,00	0,0	9,34	6,56
	3-4	52,5	0,00	0,00	0,00	7,28	3-4	395,1	0,00	0,0	53,44	13,53
	4-5	54,1	0,08	0,14	0,14	11,01	4-5	211,4	0,00	0,0	14,43	6,83
	5-6	122,0	0,00	0,00	0,00	3,89	5-6	306,6	0,07	0,0	20,58	6,71
	6-7	91,4	0,00	0,00	0,00	4,83	6-7	231,1	0,00	0,0	14,64	6,33
	7-8	107,4	0,00	0,00	0,00	2,44	7-8	402,9	0,29	0,1	83,55	20,74
	8-9	156,9	0,00	0,00	0,00	4,69	8-9	407,5	2,93	0,7	95,91	23,54
	9-10	206,9	0,00	0,00	0,00	2,28	9-10	229,0	0,13	0,1	13,89	6,07
	10-11	178,2	0,00	0,00	0,00	2,96	10-11	153,7	0,00	0,0	3,26	2,12
	11-12	188,0	0,00	0,00	0,00	3,1	11-12	128,0	0,09	0,1	4,79	3,74
	12-13	206,0	0,00	0,00	0,00	5,79	12-13	144,3	0,00	0,0	1,07	0,74
	13-14	98,6	0,00	0,00	0,00	11,03	13-14	175,2	0,00	0,0	9,22	5,26
Sustrato rocoso	14,4	22,8	0,08	0,36	0,36	16,45	13,8	165,6	0,14	0,1	2,91	1,76
	14,6 m	22,6	0,00	0,00	0,00	9,12	14,0	63,8	0,00	0,0	1,26	1,98
	14,8	31,3	0,00	0,00	0,00	4,47	14,8	31,1	0,14	0,5	7,66	24,67

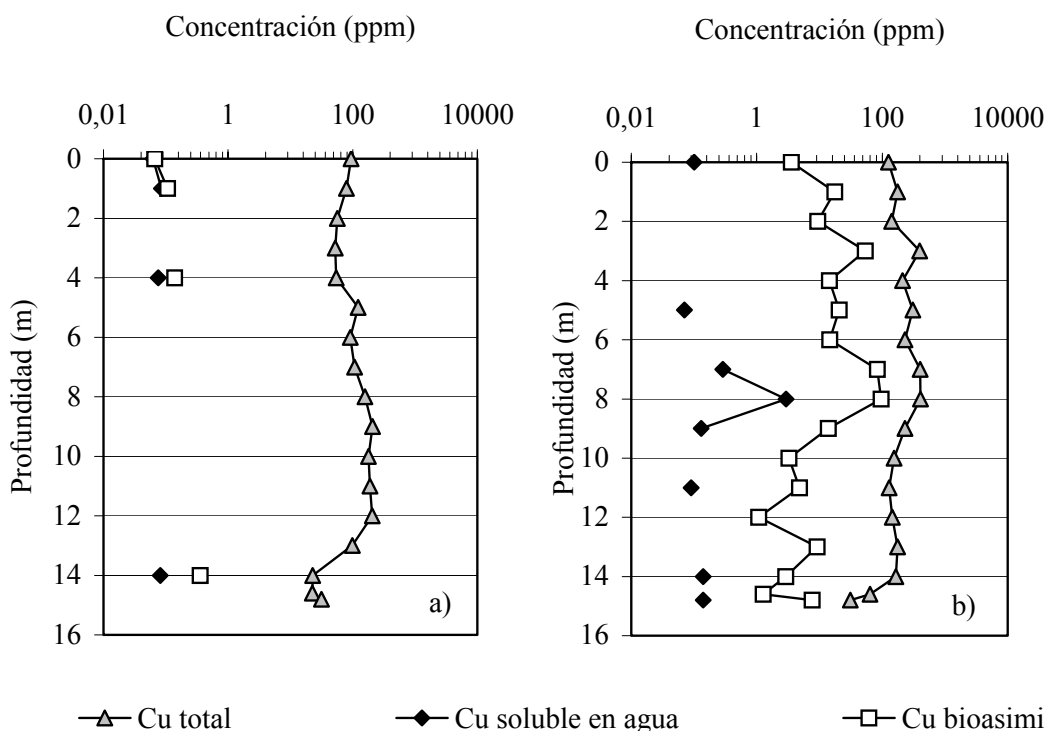


Figura 8.12. Distribución de Cu total, soluble y bioasimilable en los sondeos de dos balsas de lodos de flotación, a) “El Lirio” y b) “Brunita” (Elaborada con datos de la Tabla 8.8).

Cadmio (Cd): la concentración de Cd total es pequeña en las dos balsas comparada con la del Pb y el Zn (Tabla 8.9). Se puede apreciar la existencia de un porcentaje bioasimilable muy importante respecto al total en la parte superior del suelo, que es

donde se desarrolla la colonización de las diferentes especies de plantas. Se observa que, a pesar de que en estas dos balsas existe una diferencia en superficie de pH y conductividad eléctrica apreciable en el primer metro, el Cd bioasimilable es similar en las dos y superior al 20% del total en ambos residuos (Figura 8.13).

Tabla 8.9. Concentración de Cd total, soluble y bioasimilable en los sondeos de las balsas de lodo “El Lirio” y “Brunita” (Faz et al, 2003 a y b).

	Balsa de lodos “El Lirio”						Balsa de lodos “Brunita”					
	P (m)	Cd(T) (ppm)	Cd(S) (ppm)	% del total	Cd(B) (ppm)	% del total	P (m)	Cd(T) (ppm)	Cd(S) (ppm)	% del total	Cd(B) (ppm)	% del total
Residuo minero	0-1	29,0	0,46	1,57	6,65	22,90	0-1	11,7	0,38	3,24	2,70	23,04
	1-2	18,0	1,02	5,67	4,43	24,64	1-2	20,2	0,23	1,14	1,03	5,11
	2-3	16,2	0,41	2,54	3,94	24,38	2-3	29,3	0,00	0,00	0,39	1,33
	3-4	12,6	0,36	2,89	3,45	27,42	3-4	10,3	0,71	6,92	1,20	11,70
	4-5	9,4	0,20	2,12	3,13	33,33	4-5	117,2	0,59	0,50	4,49	3,83
	5-6	47,8	0,32	0,68	3,39	7,09	5-6	21,2	0,63	2,98	5,32	25,14
	6-7	18,1	0,35	1,94	3,11	17,21	6-7	17,8	0,58	3,26	1,06	5,96
	7-8	22,2	1,55	7,00	9,30	41,89	7-8	16,5	1,28	3,09	1,66	10,04
	8-9	38,2	0,46	1,19	3,35	8,77	8-9	12,5	3,50	5,59	6,26	50,00
	9-10	32,6	0,55	1,69	3,40	10,43	9-10	35,7	0,70	2,35	0,84	2,35
	10-11	24,6	1,28	5,20	7,61	30,91	10-11	33,7	0,43	1,54	0,52	1,54
	11-12	25,0	1,43	5,70	9,07	36,28	11-12	31,0	1,03	3,68	1,14	3,68
	12-13	30,6	0,64	2,10	7,79	25,49	12-13	44,4	0,00	0,00	1,30	2,93
	13-14	11,6	0,31	2,69	4,01	34,45	13-14	44,0	0,41	0,93	1,38	3,14
Sustrato rocoso	14,4	1,2	0,15	13,30	0,96	83,48	13,8	24,1	0,36	1,49	0,36	1,49
	14,6	0,7	0,29	43,48	0,34	51,52	14,0	19,9	0,24	1,21	0,18	0,90
	14,8	0,7	0,27	38,31	0,76	107,04	14,8	9,2	0,32	3,49	1,07	11,66

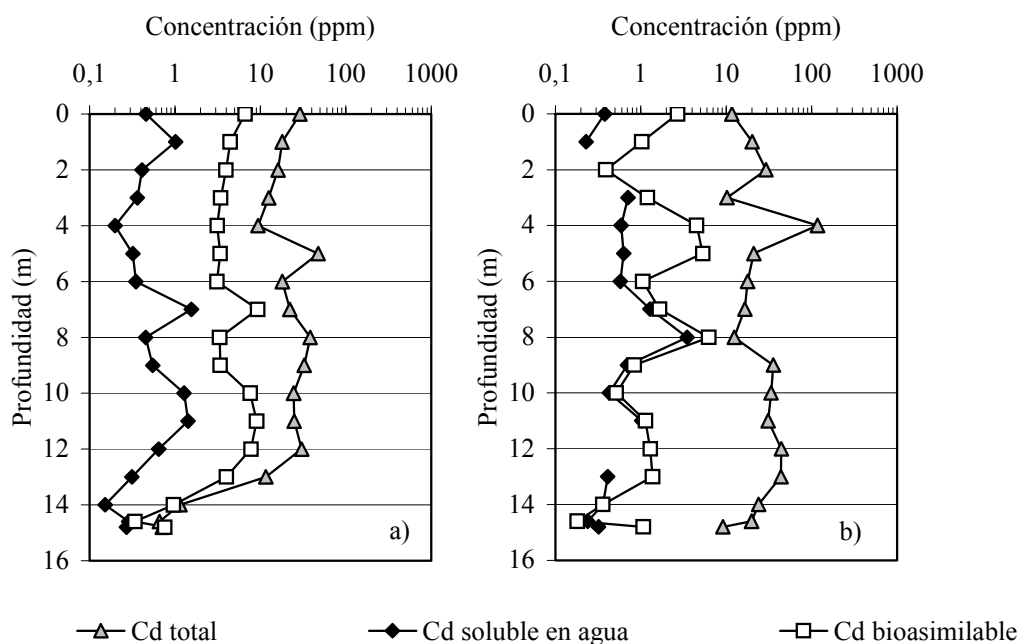


Figura 8.13. Distribución de Cd total, soluble y bioasimilable en los sondeos de dos balsas de lodos de flotación, a) “El Lirio” y b) “Brunita” (Elaborada con datos de la Tabla 8.9).

Si se analizan los resultados de las diferentes Tablas (8.5 a 8.9) que se han expuesto en el trabajo, en casi todos los residuos analizados se puede comprobar que en uno o varios metales se supera ampliamente el valor de lixiviado establecido en la normativa DIN vigente, por lo que se puede decir que estos residuos presentan cierto riesgo ambiental, y requieren la aplicación de medidas correctoras.

8.9. DISCUSIÓN

De todos los riesgos ambientales tratados, se puede concluir que el riesgo por erosión es el más importante por las implicaciones medioambientales que presenta. Los efectos de la erosión de los depósitos de residuos mineros se manifiestan en la contaminación del suelo, cauces de ramblas, del medio marino y por la pérdida de estabilidad de las balsas de residuos. De todos los depósitos de residuos, los que mayor riesgo presentan son los lodos de flotación, seguidos de los de gravimetría.

En cuanto al riesgo de transferencia al medio hídrico, se ha podido comprobar que prácticamente todos los residuos presentan la propiedad de lixiviar cierta cantidad de metal al ponerse en contacto con el agua. La masa de metal lixiviada al medio es dependiente del pH inicial de la fase sólida.

Si se analizan los datos de lixiviado de metales obtenidos con la aplicación de las norma DIN (Figura 8.7 y Tabla 8.3) y la concentración de metales en las aguas subterráneas en función del pH (Figura 6.22), se puede observar que en ambos casos existe una barrera geoquímica en función del pH que limita la movilidad de los principales metales (Pb, Zn, Cd, Ni y Cu).

Si se analiza la información existente de la concentración de metales en las aguas superficiales (ver Tabla 6.2), subterráneas (ver Tablas 6.3, 6.4 y 6.5), marinas (ver Tablas 7.10, 7.11, 7.12 y 7.13), de precipitación (ver Tabla 6.1), de concentración de metales en los suelos (ver Figuras 7.2, 7.3, 7.4, 7.5 y 7.7), de plantas (ver Tabla 7.2), animales (ver Tablas 7.3, 7.6, 7.7, 7.8, 7.9, 7.14, 7.15 y 7.16) se puede constatar que las fracciones de metales acumuladas en cada una de estas son una proporción que raras veces se aproxima a la masa de metal bioasimilable y soluble existente en estos residuos (Tabla 8.4). Todo esto pone de manifiesto que el riesgo ambiental de estos residuos perdurará en el tiempo, pues es un proceso que está condicionado por el ciclo climático y la variación espacio temporal de las diferentes variables ambientales en la Sierra Minera.

Como resumen se ha realizado el mapa de riesgo ambiental de la Sierra de Cartagena-La Unión (Figura 8.14) fundamentado en la situación de los residuos minero-metalúrgicos

y zonas mineras. Se extienden por una superficie aproximada de 55 km² y se han establecido cinco zonas que de Oeste a Este son las siguientes:

- I) Zona del Castillo de San Julián: definida por un grupo de pozos mineros excavados en las dolomías negras de la Unidad Alpujárride Superior (Unidad de Portman), donde se explotaba una fina capa de galena asociada a las dolomías (tipo franciscana). Ocupa aproximadamente 2,44 km².
- II) Zona de La Parreta: constituida principalmente por un grupo de pozos mineros, con algunas escombreras y balsas de lodos de flotación y restos de interés arqueo-industrial minero. Ubicados en la Unidad Alpujárride Superior (Unidad de Portman). De extensión reducida 0,90 km².
- III) Zona del Llano-La Unión-Portman: ocupa la parte central de la Sierra Minera y en ella se concentran todas las estructuras mineras inventariadas (excepto los pozos de las zonas I, III, IV y V), las reservas de mineral, las áreas de minería subterránea y el litoral del Mar Mediterráneo afectado en la zona de estudio (bahías del Portman y Gorguel). Es la de mayor extensión, pues ocupa del orden de 48,78 km². Esta zona está ampliamente explicada en el Capítulo 2.
- IV) Zona del Huerto de las Calesas: constituida por un pequeño grupo de pozos mineros, con 0,28 km² de ocupación. Existen pozos excavados en el mioceno donde se ha extraído barita y otros en el Paleozoico donde se ha explotado galena argentífera.
- V) Zona de Las Cobaticas: engloba un pequeño grupo de pozos mineros, donde se ha extraído manganeso y barita. También de escasa extensión (0,32 km²).
- VI) Zona de Cala Reona: constituida por un grupo de pozos mineros, excavados en los esquistos cuarzo grafitosos de la Unidad Nevado-Filábride Inferior, donde se han explotado filones de plomo con plata. Ocupa una extensión aproximada de 2,39 km².

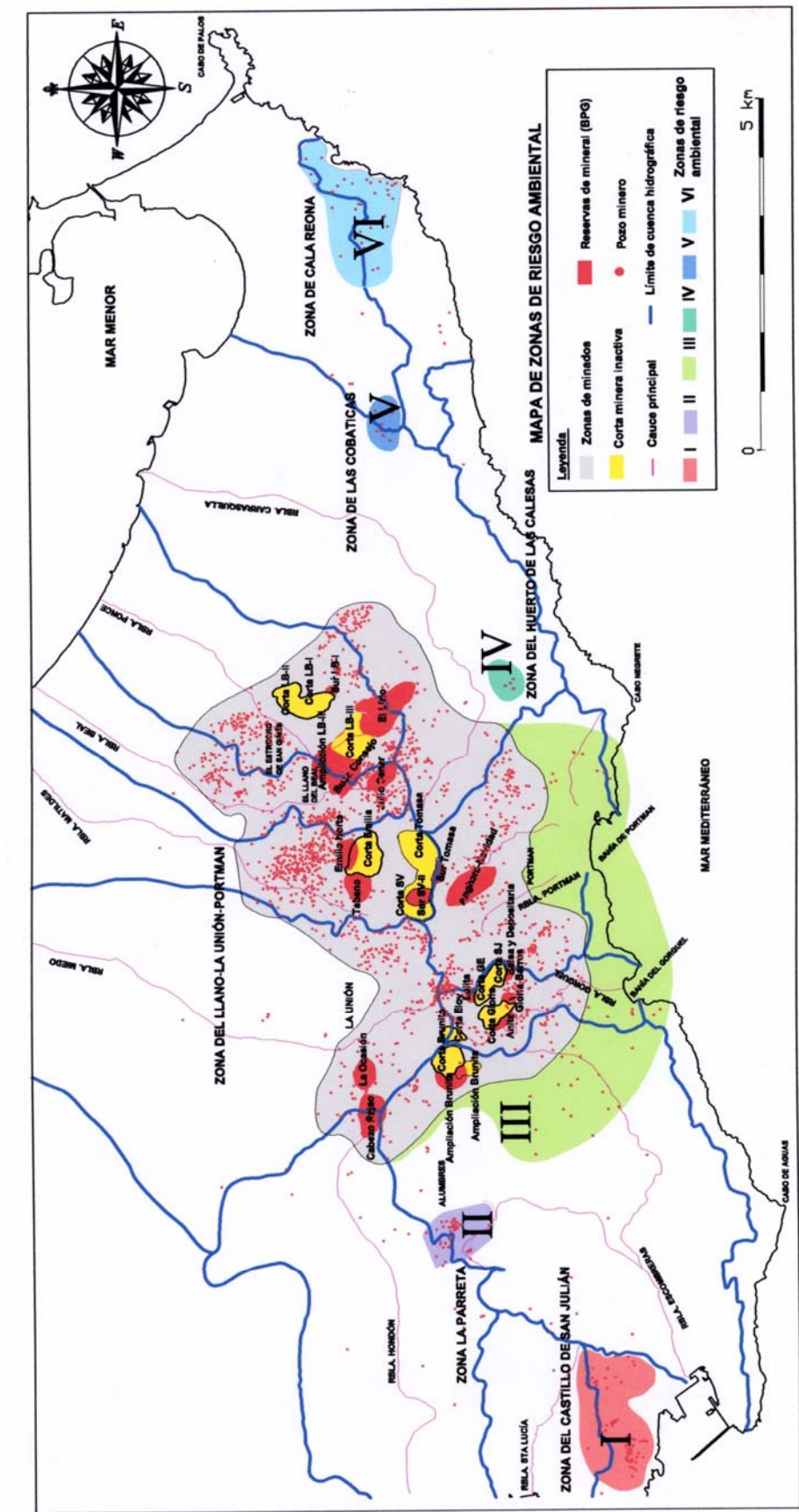


Figura 8.14. Mapa de zonas de riesgo ambiental debido a las estructuras mineras de la Sierra de Cartagena-La Unión. Mapa reducido del original a escala 1:25.000.

CAPITULO 9. MEDIDAS CORRECTORAS

CAPITULO 9. MEDIDAS CORRECTORAS

Antes de proceder a corregir los impactos ambientales producidos por efecto de la minería, se ha de tener en cuenta lo que se pretende hacer en la Sierra Minera, con el objetivo de garantizar un uso racional de los recursos y aumentar la calidad medio ambiental de toda la zona y su radio de influencia, así como su patrimonio geológico y minero.

Son varios los organismos públicos implicados en la regeneración de la Sierra Minera, tales como las Direcciones Generales de Cultura, Industria, Turismo, Obras Públicas. También empresas privadas como Portman Golf, S.A., etc.

Las medidas correctoras han de servir para eliminar o minimizar los efectos negativos producidos por las actividades mineras y los residuos minero-metalúrgicos. Los diferentes tipos de medidas que se proponen deben servir para:

- a) Compensar el impacto ambiental producido, corrigiendo o eliminando la causa que lo origina.
- b) Restauración de las áreas degradadas por las actividades mineras y los depósitos de residuos, lo que implica establecer una comunidad vegetal que evite la dispersión de contaminantes y la acidificación por minería.

9.1. REFORESTACIÓN Y RECUPERACIÓN DE LAS AREAS AFECTADAS POR LA ACTIVIDAD MINERA

Hay que evitar que aumente la afección a los 50 km² de suelo ocupados y/o roturados directamente por la actividad minero-metalúrgica. Hay zonas que se pueden rescatar para otros usos, tales como las ocupadas por escombreras de estériles de pozos mineros, las cuales pueden volver a ocupar el hueco de donde proceden. De este modo se podría solicitar el cambio de uso minero a industrial u otro, teniendo en cuenta la normativa vigente (Decreto 57/2004, de 18 de junio, por el que se aprueban las “Directrices y Plan de Ordenación Territorial del Litoral de la Región de Murcia”).

La condición de clima semiárido, unida a la falta de un medio apropiado para almacenar agua, y las nefastas propiedades y características físico-químicas de los suelos y residuos, hace que la recuperación de la cubierta vegetal en las áreas afectadas sea muy difícil. La existencia de: cortas mineras con fuertes pendientes de sus taludes; balsas y escombreras con importante desarrollo de cárcavas; el predominio de materiales no terrosos y la contaminación del medio por metales pesados, no favorecen el desarrollo de vegetación. Las escombreras formadas por materiales de diversa naturaleza, de diferente composición geológica y mineralógica y diferentes propiedades físicas,

granulométricas y de cohesión, son muy abundantes y han estado sometidas a la colonización vegetal durante distintos periodos. En ellas, la presencia de vegetación varía con las propiedades de los materiales, pero no pasa de ser dispersa y escasa en el mejor de los casos. En las pistas, la compactación del terreno y la intensidad de la erosión, dificultan el desarrollo de la vegetación. Es de señalar, que a pesar de las difíciles condiciones, en la zona se desarrollan diferentes especies, como las que se caracterizan a continuación y que se recogen en un trabajo de Faz et al., (2003a y b).

En medios alterados de carácter pedregoso puede aparecer una asociación dominada por *Phagnalon saxatile*, presente en antiguas escombreras. En algunas partes bajas de taludes de escombreras se encuentra la asociación dominada por la quenopodiácea *Salsola genistoides* y caracterizada por la presencia del iberoafricanismo *Launaea arborescens*. Por otro lado, en algunos taludes de escombreras, se presenta de forma puntual y en la parte superior de las balsas otra asociación dominada por *Capparis sicula*.

9.1.1. FACTORES LIMITANTES AL CRECIMIENTO DE LA VEGETACIÓN

Los factores limitantes en los procesos colonización vegetal se pueden agrupar en dos grandes grupos (Faz et al., 2003a):

- a) Factores endógenos, estrictamente relacionados con la naturaleza físico/química del depósito de residuos.
- b) Factores exógenos, relacionados con la actuación de los agentes erosivos externos y el hombre.

9.1.1.1. Factores endógenos

Entre los diversos factores endógenos que actúan como limitantes al crecimiento vegetal, se deben diferenciar entre los relacionados con las propiedades químicas y los ligados a las propiedades físicas de los sedimentos del depósito.

9.1.1.1.1. Factores químicos

a) **Metales pesados.** Las elevadas concentraciones de metales pesados biodisponibles presentes en las balsas de residuos (Tabla 9.1) tienen notables efectos tóxicos que limitan el crecimiento vegetal.

Tabla 9.1. Contenido (ppm) de metales pesados biodisponibles en los lodos de flotación (Faz et al., 2003 a y b).

Muestras	pH H ₂ O	pH KCl	C.E (dS/m)	Zn	Pb	Cu	Cd
Balsa El Lirio							
Zona C1	7,77	7,53	3,57	161,12	43,94	1,38	2,69
Zona C2	7,74	7,61	9,05	187,01	301,00	1,05	5,00
Zona C3	7,75	7,55	6,61	192,20	224,51	0,48	5,72
Balsa Brunita							
Zona C1	2,50	2,26	36,10	554,20	2,07	6,59	3,55
Zona C2	3,34	2,92	21,21	626,25	12,28	4,82	4,16
Zona C3	3,23	3,00	23,97	815,71	22,43	6,15	4,77

Sin embargo algunas especies han desarrollado ecotipos que les permiten colonizar estas superficies (*Zigophyllum fabago* L.) (Fotos 9.1 y 9.2).

**Foto 9.1.** *Zigophyllum fabago*.**Foto 9.2.** Germinación de semillas de *Zigophyllum fabago* sobre residuo.

El desequilibrio registrado en la solución del suelo provoca una respuesta negativa, que se traduce en la ausencia de vegetación sobre las balsas de lodos ya que la carga de iones es excesiva y ante los valores de pH obtenidos y la masa de metales solubles y biodisponibles, se convierten en elementos fitotóxicos.

b) Sales. La toma de agua de origen marino en el proceso de tratamiento de mineral y su recuperación y reutilización constante en el circuito de lavado, ha provocado que los residuos adquieran una gran cantidad de sales (Foto 9.3 y 9.4), aunque parte de estas sales son inherentes a la composición de la materia prima empleada (baste recordar que la mina “El Lirio” explotaba los filones encajados en los materiales miocénicos de origen marino, areniscas, conglomerados, margas negras, grises, con apreciable contenido en sales. Además hay que añadir el hecho de que también se emplearon diferentes sustancias químicas en el proceso minero-metalúrgico (ver Capítulo 2, Tabla 2.6).

La abundancia de estas sales, mayoritariamente Cl⁻ y SO₄²⁻ de Na⁺, K⁺, Mg²⁺ y Ca²⁺ da lugar a fenómenos de histéresis que dificultan la absorción de los nutrientes por las

raíces de las plantas (Kabata-Pendias y Pendias, 1992). Durante los procesos de precipitación o cristalización de estas sales en la superficie de los residuos, se desencadenan importantes procesos de oxidación que dan lugar a la alteración de los sulfuros (minerales primarios como el FeS_2 , PbS , ZnS , etc.), y su transformación en sulfatos, movilizándose una gran cantidad de metales que se concentran en los primeros centímetros de la superficie del suelo o residuos estudiados. Por tanto también constituyen un importante factor limitante de la colonización vegetal.



Foto 9.3. Panorámica del área afectada por presencia de sales solubles. Junto al núcleo urbano del “Llano del Beal”.



Foto 9.4. Detalle de sales precipitadas sobre los residuos mineros. Balsa de lodos La Esperanza.

c) Ausencia de macro-elementos (N, P, K) y micro-nutrientes (Fe, Cu, Mn y Zn).

Las plantas sintetizan sus alimentos a partir de elementos químicos que toman del aire, agua y suelo. Existen 60 elementos químicos constituyentes de las plantas, de los cuales 16 son esenciales y que podemos dividir en macronutrientes primarios (N, P y K), secundarios (Ca, S, Mg) y micronutrientes u oligoelementos (B, Cu, Cl, Fe, Mn, Mo, Zn). Aspectos tales como clase estructural desequilibrada, ausencia o baja presencia de estructura edáfica debido a la escasez de componentes coloidales, escasez o desequilibrio de estos nutrientes mencionados, baja capacidad de cambio y baja retención de agua, hacen de los suelos de mina unos medios pobres o deficientes para el crecimiento vegetal.

9.1.1.1.2. Factores físicos

a) Textura. Se trata no sólo del principal factor físico limitante del crecimiento vegetal, sino que también es un factor condicionante del resto de las propiedades físicas de los residuos, como la capacidad de retención hídrica, la porosidad, la infiltración y la conductividad hidráulica, ya que están intrínsecamente relacionadas con ésta.

Los valores medios texturales en la superficie de los depósitos de los lodos de flotación oscilan entre la clase textural limo-arenoso y arenoso (FAO-ISRIC, 1990), por lo que la capacidad de retención hídrica, la permeabilidad, la tasa de infiltración y la

conductividad hidráulica saturada presentan valores relativamente bajos (10^{-6} a 10^{-9} m/s) en el medio poroso; sin embargo, la existencia de grietas de desecación y planos de estratificación, facilita el flujo preferencial del agua subterránea en sectores concretos.

Frente a estos, los depósitos de concentración gravimétrica presentan una granulometría arenosa (FAO-ISRIC, 1990), por que las variables físicas presentan una dirección y magnitud contrarias a los anteriormente descritos.

b) Estructura. Pese a que la granulometría o textura de los depósitos es clasificada por FAO-ISRIC y USDA como buena, la presencia de agentes cementantes como los óxidos e hidróxidos de hierro dan lugar a la formación de encostramientos (Foto 9.5) (con una potencia que oscila entre 12 y 20 cm.) muy endurecidos, que conforman una estructura masiva o coherente fuertemente cementada, lo que provoca dificultades en la penetración de las raíces de las plantas. Se trata, por tanto, de un tipo de estructura asfixiante muy hostil para el crecimiento vegetal.

En otros sectores, como las zonas de los bordes de los depósitos, se produce el fenómeno opuesto: la ausencia de estos agentes da lugar a la formación de suelos, con una estructura particular o suelta, resultado de la deposición de arenas transportadas por la acción erosiva del viento (Foto 9.6). En ocasiones, estos depósitos se encuentran débilmente cementados por la presencia de sales solubles muy lábiles y son capaces de ser colonizadas en sus primeros estadios por especies como *Lygeum spartum* (albardín) o *Helichrysum decumbens* (siempreviva) (Conesa et al., 1989).



Foto 9.5. Estructura masiva o coherente cementada por la presencia de óxidos de hierro resultado de la alteración de los sulfuros.



Foto 9.6. Estructura particular o suelta en proceso de estabilización por *Ammophyla arenaria*.

9.1.1.2. Factores exógenos

Bajo este grupo se engloban los agentes erosivos (viento, agua y hombre) que dan respectivamente lugar a la erosión eólica, hídrica y antrópica. Estos agentes se

caracterizan, en el área de estudio, por tener una magnitud, dirección e intensidad, en muchos casos, contraria al proceso de colonización vegetal sobre los residuos.

La acción erosiva del agua impide que se produzca la estabilización de los residuos y evita la acumulación de constituyentes orgánicos que mejoren tanto las propiedades físicas como químicas, motivo por el que se dificulta la formación de un suelo apto para la colonización vegetal. En menor medida actúa el viento.

Pero contrariamente a lo expuesto, en las zonas deprimidas superficiales, donde se produce la retención de aguas temporales, el sustrato se ve enriquecido con el aporte de las aguas de escorrentía que transportan limos, materia orgánica y nutrientes procedentes de los sectores naturalizados, dando origen u ocasionando una mejora de las propiedades físico/químicas, propiciando la formación de comunidades vegetales de macrófitas o hidrófilas.

Actualmente, sobre los depósitos de residuos se están desencadenando los procesos de edafogénesis, que tienen como resultado la formación de suelos jóvenes o poco evolucionados con alto contenidos en metales pesados, designados por FAO-ISRIC-ISSS, 1998 como Regosoles antrópicos-espólicos.

9.1.2. REFORESTACIÓN

Para poder realizar la reforestación, es necesario seguir una metodología de restauración que consistiría en crear las condiciones idóneas para que se desarrolle la vegetación. Comprendería las siguientes fases:

- Creación de las condiciones geomorfológicas (pendientes del terreno) adecuadas para evitar o reducir los procesos erosivos.
- Construcción en la cabecera de las balsas de un sistema de colectores para recoger la escorrentía superficial y encauzarla a las zonas de los cauces de las ramblas para evitar la acción sobre los residuos mineros.
- Creación del sustrato donde pueda desarrollarse la vegetación.

Como se ha visto, son numerosos los factores que limitan el proceso de colonización y desarrollo vegetal en el suelo, por lo que se sugiere la creación de un sustrato de mejores características al existente, en las zonas que se encuentren afectados y un sustrato nuevo en las zonas donde hay ausencia total del mismo. El nuevo sustrato debe permitir la pronta restauración de la cubierta vegetal con objeto de disminuir los riesgos inherentes al depósito de residuos por acción de la erosión hídrica y eólica, la

transferencia de contaminantes metálicos al subálveo, infiltración de los lixiviados ácidos ricos en metales pesados y sulfatos a las aguas subterráneas.

La composición y creación de éste podría ajustarse al siguiente esquema:

- a) Creación de un sustrato de origen mineral estratificado en:
 - Sustrato con propiedades confinantes de los residuos.
 - Sustrato con propiedades aptas para la restauración vegetal.
- b) Adición de enmienda orgánica.

9.1.2.1. Sustrato mineral

La presencia de escombreras de areniscas y filitas, de textura arenosa y con un alto contenido en gruesos pueden ser la base para la creación del sustrato mineral primario a emplear, cumpliendo una doble función ya que por un lado se eliminaría el fuerte impacto visual que causan y por otro se economizarían los costes de transporte y adquisición de nuevos préstamos como materiales de relleno. Además, estos materiales pueden ser extraídos con facilidad, debido a que están prácticamente sueltos.

Dada la baja permeabilidad que presentan los materiales filíticos (estériles de corta y pozos, Capítulos 4 y 5), se propone su empleo como agente de sellado, evitando así el uso de geotextil u otras fibras similares de elevado coste en el mercado, aunque es una posibilidad que también se puede valorar. El esparcido de una capa de aproximadamente 30 cm sobre toda la superficie del depósito de lodos o suelos contaminados, podría ser suficiente para confinar los residuos. Sobre este sustrato filítico se podrán depositar los materiales de la escombreras de areniscas combinados con un sustrato edáfico (manto orgánico) procedente de los aledaños o residuos orgánicos de otros procesos como son los lodos de depuradora y residuos agrícolas y ganaderos.

También se podría utilizar como sustrato mineral lodos procedentes de la industria de elaboración de mármoles, siempre y cuando el coste del mismo compense el rendimiento a obtener.

9.1.2.2. Enmienda orgánica

La mejora húmica del sustrato mineral, se realizara con el aporte de una cantidad (según contenido de N, P, K) de estiércol maduro con cama de ganado ovino, caprino o porcino, dado que las fuentes de producción cercanas se corresponden con este tipo de cabañas ganaderas, disminuyéndose los costes de transporte (Faz et al., 2003 a y b).

El objetivo de la aplicación de este tipo de enmienda es proporcionar un cierto nivel de materia orgánica que, aunque sea bajo, pueda permitir una mejora de la agregación de las partículas, lo que implica un descenso de los valores de erosividad por un aumento de estabilidad de los complejos arcillo-húmicos del suelo al aumentar la cohesión de los residuos mineros, que como se veía en el Capítulo 5, es muy baja.

Se recomienda la mezcla previa con el sustrato mineral con el fin de realizar el aporte conjunto, pero siéndolo ésta en la última secuencia de deposición. En el caso de no mezclar, se debe incorporar en las próximas 24 horas tras la aplicación del primero.

9.2. SELLADO DE POZOS MINEROS

El sellado de los pozos es posible y con él se eliminarían varios problemas, entre los que figura el hundimiento y derrumbe de la parte superior de éstos con el terreno circundante (Foto 9.7). Para el llenado hay que tener en cuenta el criterio de si intercepta el nivel piezométrico o no. En el caso de que corte el nivel freático, como en muchos casos, donde el pH es ácido y la presencia de metales en el agua es muy común (ver Capítulo 6), el material de relleno puede ser una mezcla de margas, filitas y lodos de la industria del mármol, que tienen la particularidad de subir el pH y con ello acelerar la precipitación de los metales presentes en las aguas subterráneas (ver Capítulo 6). También se puede evaluar la utilización de productos químicos para neutralizar el pH, pero estos representan un coste económico más elevado.



Foto 9.7. Rotura del brocal en el pozo 117-C167 por hundimiento del terreno.

9.3. TRAMPAS DE SEDIMENTOS

Para evitar el aporte de sedimentos a la laguna del Mar Menor y al Mar Mediterráneo es necesario la construcción de sedimentadoras en las diferentes ramblas. Para esto se pueden emplear gaviones como los construidos en las ramblas de la Bahía de Portman (Capítulo 7, Foto 7.4).

Estos gaviones tienen la propiedad de ser muy permeables y retener el sedimento, facilitando el desarrollo de la vegetación en el lecho del cauce de las ramblas (Capítulo 7, Foto 7.5). Es necesario que su construcción permita realizar el mantenimiento

necesario, pues en los que se han colocado se puede apreciar que algunos están colmatados (Fotos 9.8 y 9.9)



Foto 9.8. Presa de residuos en la cabecera de la rambla La Carrasquilla.



Foto 9.9. Aguas debajo de la presa de la rambla La Carrasquilla.

9.4. RELLENO DE HUECOS MINEROS Y CORTAS

Se puede realizar el relleno de las cortas aunque (como en el caso de los pozos mineros con agua) resulta muy difícil, ya que en ellas a veces se intercepta el nivel freático, como en las de Brunita (Foto 9.10) y Los Blancos-II (Foto 9.11). Es necesario tener en cuenta el tipo de relleno, pues el agua de las cortas se caracteriza por tener un pH muy ácido (ver Capítulo 6).

Es de señalar que también puede evaluarse la posibilidad de utilizar éstas como vertederos, principalmente las que se encuentran secas y siempre que se apliquen las normativas vigentes en la construcción de depósitos, en función del tipo de residuo a almacenar. En el caso de las que presentan agua se ha de tener en cuenta este factor y realizar previamente su acondicionamiento según la normativa ambiental.



Foto 9.10. Laguna en la corta Brunita.



Foto 9.11. Laguna en la corta Los Blancos-II.

Considerando la superficie y la cota donde se encuentra el agua, y la profundidad alcanzada en cada una de las cortas, para realizar su llenado hasta la parte superior del nivel del agua, haría falta un volumen aproximado de 845.000 m³ para la corta Brunita y de 107.000 m³ para la corta Los Blancos-II (Tabla 9.2). En este caso el material a utilizar puede ser una mezcla de filitas, rocas carbonatadas (se podrían incluir los lodos del mármol), que neutralicen la acidez de las aguas almacenadas en ellas (pH entre 2 y 3) y con ello provoquen la precipitación de los metales al subir el pH. También puede considerarse en este caso el uso de productos químicos.

Tabla 9.2. Volumen de agua almacenado en las cortas Brunita y Los Blancos –II (Septiembre 2004).

Corta minera	Brunita	Los Blancos-II
Superficie a nivel del agua (m ²)	38.250	16.500
Cota del plano de agua (m s.n.m.)	124	20
Cota de fondo de la corta (m s.n.m.)	90	10
Volumen almacenado (m ³)	845.325	107.250

9.5. ELIMINACIÓN DE BALSAS Y ESCOMBRERAS

Se propone la eliminación de las balsas que representan un impacto visual importante, principalmente las que se encuentren en la cuenca visual de las playas y las que estén en zonas cercanas a los núcleos de población. Entre estas se encuentran, por ejemplo, las que están dentro de la cuenca visual de Portman (CPTOP, 1995). Esta es una actividad que se está desarrollando en la actualidad en la balsa Jenny, al Sur del Llano del Beal, que están siendo trasladados los lodos a la corta Los Blancos-I (Fotos 9.12 y 9.13).



Foto 9.12. Carga y transporte de los lodos de la balsa Jenny (Septiembre 2004).



Foto 9.13. Descarga de los lodos procedentes de la balsa Jenny a la corta Los Blancos-I (Septiembre 2004).

El almacenamiento de estos residuos se puede realizar en las propias cortas mineras de donde fueron extraídos los minerales beneficiados. Es necesario realizar una impermeabilización adecuada de los vasos de las cortas y luego proceder a su completa restauración, pues en el caso de la corta Tomasa no se hizo así y los lixiviados de ésta han contaminado las aguas subterráneas (ver Capítulo 6) (CHS, 1991).

9.6. LIMPIEZA DE LAS BAHÍAS DE PORTMAN Y EL GORGUEL

En cuanto a la Bahía de Portman, se considera que es viable su limpieza, aunque su coste económico puede ser extremadamente caro. Esto representaría una mejora incalculable para la zona, pues permitiría su reactivación económica. Para esta actividad existen varios estudios realizados con diferentes variantes tanto del ITGE, (1996), como de la CARM., siendo éste uno de los objetivos que persigue el último organismo desde hace varios años.

Además de la limpieza de la Bahía de Portman sería aconsejable limpiar la del Gorguel, que representa gran singularidad en cuanto a su paisaje y biodiversidad. En este caso, el coste económico sería menor.

9.7. LIMPIEZA DE LAS RAMBLAS

Sería muy conveniente realizar una limpieza de las acumulaciones de residuos que se encuentran en el cauce de las ramblas, por donde circulan las aguas superficiales durante los periodos de precipitación; con esta medida se evitaría el aporte directo de sedimentos y metales pesados al Mar Menor y al Mediterráneo. Además, al disminuir el volumen de residuos almacenados en las ramblas y construir las trampas de sedimentos (gaviones) y la eliminación de las balsas de lodos, se disminuiría el aporte de sulfatos y metales en solución y suspensión, que se producen por la disolución de las costras de sales presentes en la superficie de las balsas de lodos y las de gravimetría principalmente.

9.8. MEDIDAS CORRECTORAS SOBRE EL PAISAJE

Los huecos de excavación y los depósitos de estériles producidos por la minería a cielo abierto constituyen, como ya se ha dicho, uno de los elementos de mayor intrusión en el entorno, provocando cambios en las características visuales de la zona, proporcionales a la alteración fisiográfica producida, y alteraciones en la calidad paisajística debido a la introducción de colores, texturas y formas discordantes con las del entorno natural y que suponen una pérdida de naturalidad (pérdida de vegetación, contraste estructural y modificación del relieve). En conclusión, el paisaje se verá corregido en tanto se actúe con los elementos que en él interactúan.

9.9. MEDIDAS CORRECTORAS SOBRE LA FAUNA

En este aspecto es muy difícil realizar una valoración, pues la información sobre el impacto ambiental sobre la fauna es muy limitada. Aunque hay que señalar que según los datos recogidos en el Capítulo 7, existen elementos contaminantes en una gran variedad de especies de flora y fauna.

9.10. MEDIDAS CORRECTORAS SOBRE EL PATRIMONIO CULTURAL

En la Sierra Minera se encuentran abundantes restos de interés arqueo-industrial minero, geológico y arqueológico que son muy importantes para su desarrollo social y cultural. Su recuperación puede ser de vital importancia en la creación de parques temáticos, rutas turísticas, además de constituir una nueva fuente de empleo para la zona (ver Capítulo 4). En esta misión están trabajando tanto organismos oficiales regionales como privados.

9.11. DISCUSIÓN

a) La restauración de las balsas de residuos y escombreras que se propone es viable y daría solución a varios de los principales problemas ambientales que existen en la zona. Al poner una capa mineral con vegetación se evitaría la formación de las costras de oxidación de sulfuros, la erosión eólica y con ello la contaminación del aire y de las aguas superficiales y subterráneas, disminuyendo el aporte de sedimentos al Mar Menor y al Mar Mediterráneo, además de eliminar el impacto sobre las ramblas.

Con la colocación de una capa vegetal entre 30 y 50 cm de espesor (Foto 9.14), es posible lograr el desarrollo de la vegetación, como ha sucedido, por ejemplo en la balsa Marqués de Pejas, donde se realizó una restauración de la balsa y se ha logrado el desarrollo de abundantes especies vegetales, entre ellas una protegida por ser única en Europa (*tetraclinis articulata* (Foto 9.15).



Foto 9.14. Capa de tierra de 20 cm situada sobre los lodos de flotación. Balsa Marqués de Pejas.



Foto 9.15. Tetraclinis articulata, desarrollado sobre la balsa restaurada Marqués de Pejas.

Aunque en la mayor parte de la balsa de lodos Marqués de Pejas, se ha desarrollado la vegetación, hay áreas en que este proceso no ha tenido lugar, debido a que la pendiente de los taludes es muy elevada (Foto 9.16) y no se ha realizado el correcto sistema de drenaje ni el mantenimiento del mismo (Foto 9.17).

Entre las medidas necesarias para el desarrollo de la vegetación, son necesarias; 1) nivelar el terreno y disminuir el ángulo y la longitud de las pendientes, para evitar el desarrollo de los procesos erosivos fundamentalmente las cárcavas, y 2) colocar un correcto sistema de drenaje.

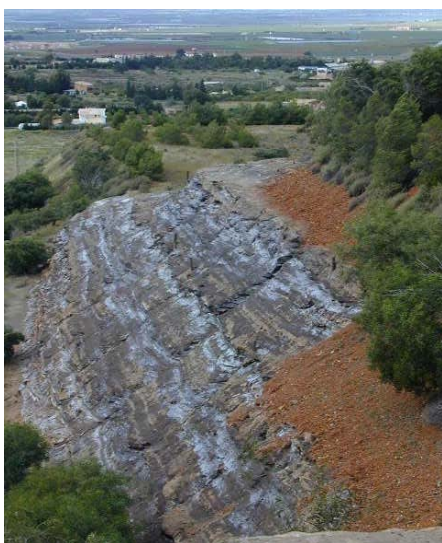


Foto 9.16. Erosión en cárcavas y ausencia de vegetación en la balsa Marqués de Pejas.



Foto 9.17. Rotura de la red de drenaje.

b) Antes de realizar los trabajos de sellado de pozos y cortas, sería necesario la realización de ensayos bach (determinación de los parámetros cinéticos como el coeficiente de reparto (k_d) y la adsorción y desorción) y de flujo en columna para determinar la capacidad neutralizadora de los materiales a utilizar; además de tener conocimiento del volumen y las ratios a emplear.

Con esta medida se disminuiría el proceso de oxidación de los sulfuros existentes en las cortas y con ello se evitaría la generación y el aporte de aguas ácidas al acuífero de la unidad hidrogeológica de la Sierra Minera.

c) La eliminación de los diferentes depósitos de residuos que se encuentran en la superficie del suelo y el llenado de las cortas mineras, permitiría poder extender sobre ellos, una capa vegetal que ocasione el desarrollo de las diferentes especies de plantas y animales.

d) Existe un patrimonio cultural (geológico, minero, arqueológico) inventariado y citado en el Capítulo 4, cuyo interés en conservarlo y desarrollarlo ha sido puesto en evidencia, a través de los proyectos que están en marcha. Además, en el mes de octubre de 2004, se ha creado un Consorcio entre la administración regional y las locales de Cartagena y La Unión, para el desarrollo de los valores patrimoniales citados. Por tanto, resulta evidente la necesidad de definir cuales son los elementos patrimoniales a preservar y potenciar, para evitar su desaparición ante cualquiera de las actuaciones propuestas en este Capítulo.

e) Para la aplicación de cualquiera de las medidas restauradoras propuestas, habrá de tenerse en cuenta el Decreto 57/2004, de 18 de junio, por el que se aprueban las “Directrices y Plan de Ordenación Territorial del Litoral de la Región de Murcia”.

CAPÍTULO 10. CONCLUSIONES

CAPÍTULO 10. CONCLUSIONES

El estudio realizado en la Sierra Minera (SM) ha permitido avanzar en el conocimiento del impacto y riesgo ambiental de los diferentes tipos de residuos generados por las actividades minero-metalúrgicas durante más de 20 siglos. La caracterización de las diferentes variables ambientales, la cartografía, clasificación y caracterización de los residuos minero-metalúrgicos nos muestra su influencia y efecto en el flujo y transporte de contaminantes.

El análisis de la información existente y los diferentes resultados obtenidos reflejan la necesidad de un análisis multidisciplinar de diferentes ramas de las ciencias, entre las que se encuentran: geología, geotecnia, hidrología superficial y subterránea, geoquímica, botánica, edafología y ciencias del medio ambiente en general.

El volumen y variedad del trabajo realizado conjuntamente con la síntesis de la información existente nos ha permitido obtener una serie de conclusiones, de acuerdo con diferentes aspectos de la problemática ambiental del área de estudio. A continuación se exponen por separado cada uno de los resultados y finalmente las conclusiones generales del trabajo y las futuras líneas de investigación.

10.1. INFORMACIÓN Y ESTUDIOS EXISTENTES

El número de trabajos realizados en el área de estudio es muy grande. Éste se puede dividir en tres partes: Sierra Minera, Mar Menor y Mar Mediterráneo. La principal limitación de éstos, es la ausencia de un análisis multidisciplinar del problema. En la mayoría de los casos solo se limitan a informar sobre la existencia del problema de contaminación, pero no se indican concretamente las causas y las fuentes de origen; aunque en todos ellos se culpa a las actividades y residuos mineros existentes en la SM de una forma genérica, sin hacer una diferenciación del problema de una forma concreta, aspecto que refleja la necesidad de un estudio de identificación y caracterización de los residuos mineros y metalúrgicos existentes en la SM. Aunque hay que señalar que los estudios sobre los residuos de la SM se habían limitado a un inventario y cartografiado parcial, centrado fundamentalmente en los lodos de flotación.

Del análisis de toda esta información se desprende que los residuos mineros, en los que se centra la presente investigación, eran prácticamente desconocidos. Solamente habían sido estudiados desde el punto de vista físico-mecánico los residuos de flotación depositados en la Bahía de Portman en el Mar Mediterráneo y algunas balsas de lodos depositadas en tierra en el área de la cuenca visual de la Bahía de Portman. Sus características geoquímicas y su impacto y riesgo ambiental, considerando las normativas vigentes, no habían sido evaluadas.

10.2. METODOLOGÍA

Durante el desarrollo de esta investigación se ha establecido una metodología para la realización del inventario de pozos mineros y se ha mejorado la existente para el inventario y cartografiado de balsas de lodos utilizada por el IGME. En el desarrollo del trabajo se han creado bases de datos automáticas que permiten su rápida actualización y comprobación de la información.

10.3. CARTOGRAFÍA

Se ha realizado el cartografiado e inventario de los pozos mineros, puntos de aguas, cortas mineras, manantiales y de los diferentes tipos de acumulaciones de residuos existentes en la SM. La cartografía e inventario se encuentra en formato papel y digital, lo que facilita su incorporación en un sistema de información geográfica y su posible utilización en la ordenación, gestión y planificación del territorio de la SM.

10.4. RESIDUOS MINEROS

En el área de estudio se han identificado y cartografiado nueve tipos de residuos minero-metalúrgicos de acuerdo a su origen: 1) estériles de corta, 2) de gravimetría, 3) de mina, 4) de pozos, 5) de granulometría, 6) óxidos, 7) lodos de flotación en tierra y 8) lodos de flotación en mar y 9) escoria de fundición.

En cuanto a su composición química se puede concluir que todos los residuos presentan elementos peligrosos o tóxicos en su composición entre los que destacan el Pb, Zn, Cd y Cu.

Durante la cartografía e inventario de los residuos minero-metalúrgicos de la SM y la realización de las investigaciones sobre caracterización físico-mecánica en el laboratorio, se ha podido comprobar que el uso de las técnicas convencionales de caracterización de los suelos naturales da resultados satisfactorios en la caracterización de los residuos minero-metalúrgicos, a pesar de que muchas de sus propiedades físicas, como el peso específico y la angulosidad de sus partículas y los parámetros de resistencia, puedan diferir de la de los suelos y materiales de origen natural. La caracterización granulométrica de estos materiales debe de realizarse en húmedo.

Los estudios de laboratorio muestran que el material sólido que constituyen los nueve tipos de residuos minero-metalúrgicos se caracteriza por tener una granulometría muy variable, condicionada por el origen de cada uno de ellos. En estos materiales se pueden apreciar residuos con partículas tamaño bloque hasta la fracción arcilla.

Los ensayos de permeabilidad, realizados en laboratorio, sobre muestras homogéneas de lodos de flotación han dado unos valores de 10^{-8} a 10^{-9} m/s; sin embargo, los ensayos in situ han demostrado que los valores son superiores, concretamente 10^{-6} a 10^{-7} m/s. El efecto de las grietas de desecación y la presencia de estratificación incrementa la permeabilidad de los residuos en más de dos órdenes de magnitud en comparación con el material no agrietado.

10.5. HIDROLOGÍA SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA

Los resultados ponen de manifiesto el impacto ambiental provocado por el cierre de las actividades mineras, sin control medioambiental ni medidas correctoras o de restauración.

De acuerdo con la composición química de los elementos mayoritarios, en las aguas superficiales y subterráneas es posible diferenciar dos tipos de agua: la facies aniónica predominante es la sulfatada (81%), acompañada de varias facies catiónicas; magnésica (24 %), sódica (16 %) y cálcica (6 %), el resto de las muestras son mixtas y responden a distintas proporciones de los tres cationes.

Las aguas subterráneas de minas y de cortas y las superficiales de carácter temporal de la SM presentan un elevado grado de contaminación y ninguna de ellas cumple los criterios de potabilidad establecidos por la Organización Mundial de la Salud (O.M.S.).

Según el Real Decreto 606/2003, de 23 de mayo (que modifica al RD 849/1986, de 11 abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico), las aguas superficiales y subterráneas de la SM contienen metales que se consideran contaminantes, lo cual las inhabilita para su uso como agua potable y en muy pocos casos puede ser usada como agua de riego. Para este uso es necesario que se tomen precauciones en función del tipo de cultivo, del suelo, así como del tiempo de aplicación. Los altos valores de sales disueltas (Zn, Pb, Mn, Fe, SO_4^{2-} y Mg^{2+}) en el acuífero son el resultado de la oxidación de los sulfuros, que está favorecida por la existencia de un flujo preferencial debido a la presencia de galerías subterráneas, pozos mineros, fallas y grietas en los materiales geológicos. Los metales tóxicos presentes en las aguas subterráneas se encuentran en forma libre (M^{2+}) o formando complejos (MSO_4^{2-}).

Los resultados de los análisis realizados y de la información histórica disponible, indican que el nivel de contaminación de las aguas subterráneas se ha incrementado a lo largo de más de 10 años de abandono de las explotaciones mineras en la SM.

La elevada mineralización de las aguas, la alta concentración de metales pesados y sulfatos en los materiales acuíferos, así como la existencia de un gradiente de las concentraciones de los contaminantes siempre creciente en dirección a las escombreras de residuos y cortas mineras, permite deducir que la contaminación de los acuíferos se ha producido por la recarga del lixiviado de los residuos que forman las escombreras de residuos y la oxidación de los materiales sulfurosos existentes en las diferentes galerías subterráneas y pozos mineros.

En el proceso de lixiviado de los diferentes metales que se incorporan al agua, el pH de la fase líquida y su composición tienen una acción preponderante. Este proceso está favorecido por la existencia de una gran densidad de fallas, fracturas y diaclasas en los materiales geológicos, así como por grietas de retracción en la superficie de las balsas de lodos, que constituyen vías de infiltración de las aguas meteóricas y de desarrollo de flujo preferencial.

Sabiendo que el desarrollo y permanencia de los procesos de contaminación del medio hídrico son función de las características de las fuentes contaminantes y del tiempo de permanencia de los contaminantes en el medio, es previsible que la contaminación de las masas de aguas continentales (aguas subterráneas y superficiales) y marinas (Mar Menor y Mediterráneo) se mantenga e incluso continúe aumentando, debido al deterioro de los depósitos de residuos, al volumen de éstos almacenado y a las condiciones climáticas de la región (lluvias torrenciales en intervalos cortos de tiempo), que favorecen el desarrollo de los procesos erosivos y el transporte de una gran masa de metales y sulfatos en solución y de sólidos en suspensión.

10.6. IMPACTO AMBIENTAL

El impacto ambiental más acentuado en el área continental y sus ecosistemas se concreta, en primer lugar en el efecto sobre el suelo, la flora y la fauna asociada a él; en segundo lugar el producido a las aguas subterráneas y, en tercero a la contaminación de la zona de ribera de las ramblas que constituyen las vías de evacuación de la escorrentía superficial.

El impacto ambiental sobre el medio marino tiene dos orígenes: el directo y más perjudicial, que es el producido en el Mar Mediterráneo (Bahías de Portman y Gorguel); y el indirecto, ocasionado a la laguna del Mar Menor. Hay que señalar que el Mar Menor, además, ha sido y está siendo afectado por actividades agrícolas y otras antrópicas que han provocado una variación en las propiedades físico-químicas del agua, lo cual no es objeto de este trabajo.

Como principales contaminantes de las aguas continentales se encuentran los metales Pb, Zn, Cd, Mn, Fe y Sr y los sulfatos. Mientras que en medio marino, el agua, los sedimentos, plantas y animales están contaminados por el Zn, Pb, Cd, Mn, Fe y Cu.

Se ha podido comprobar que, los sedimentos de las ramblas, suelos, sedimentos marinos, agua marina, aguas subterráneas, agua intersticial y la fauna marina, presentan contaminación por metales pesados (Pb, Zn, Cu, Cd) que en una gran cantidad de muestras supera el límite establecido por las normativas vigentes.

De todos los residuos, los que representan un mayor riesgo ambiental son los lodos de flotación por su fina granulometría y baja cohesión, que facilita la erosión hídrica y eólica, y al tener mayor superficie específica favorece los procesos de oxidación de los sulfuros de los minerales existentes en su composición.

La dilatada actividad minera de la Sierra de Cartagena-La Unión ha afectado una superficie de suelo de aproximadamente 100 km². Estas áreas se encuentran en un alto grado de deterioro, que requieren de una gestión ambiental y la aplicación de medidas correctoras que permitan atenuar la magnitud del impacto y riesgo ambiental de los residuos.

En la Sierra de Cartagena-La Unión se han delimitado dos zonas de impacto ambiental (ver Figura 7.40). La Zona I de impacto directo comprende: a) zona del Castillo de San Julián de 2,44 km²; b) zona del Llano-La Unión-Portman de 78,84 km² en la que se incluye el área minera s.s., la franja del litoral del Mar Mediterráneo ocupada por los lodos de flotación, y el área existente entre las ramblas Carrasquilla y las Matildes, y c) la zona de Cala Reona de 2,39 km². En conjunto, la Zona I ocupa 83,67 km². La Zona II de impacto indirecto abarca: a) las áreas del Mar Menor que tiene una extensión de 133 km² y b) el litoral del Mar Mediterráneo que se extiende desde las proximidades de Cabo Negrete al de Cabo de Palos.

10.7. RIESGO AMBIENTAL DE LOS RESIDUOS

El principal riesgo ambiental de los residuos minero es la erosión hídrica, la cual está condicionada por sus propiedades físicas, la fina granulometría de sus partículas y la naturaleza poco cohesiva de los mismos que, combinadas con las condiciones climáticas de la región (lluvias torrenciales en cortos intervalos de tiempo) pueden facilitar la erosión por la escorrentía superficial y con ello contribuir a la contaminación de las masas de aguas superficiales y marinas. Los de mayor riesgo de erosión son los lodos de flotación que presentan una granulometría limo-arcillosa. El proceso erosivo condiciona el impacto sobre las masas de aguas del Mar Menor y el Mediterráneo y los cauces y riberas de las ramblas.

El aporte continuo de sedimentos y el avance progresivo de la sedimentación en el Mar Menor proporciona cambios en la geometría y área de éste, además de provocar cambios en las propiedades físico-químicas de sus aguas y en la flora y fauna que en él se desarrolla.

Otro riesgo ambiental de importancia es el producido por los hundimientos de zonas afectadas por galerías durante la ocurrencia de movimientos sísmicos.

La rotura o falla de las balsas de residuos, por la pérdida de estabilidad durante la ocurrencia de lluvias torrenciales, es un proceso de menor importancia, aunque ya ha tenido lugar uno de gran magnitud en la balsa de lodos “Brunita”. Este proceso se justifica por las propiedades físico-mecánicas (baja cohesión, ángulo de fricción interna elevado y partículas arena limosa) de los lodos que facilitan la licuefacción de los mismos ante la presencia de un fuerte aguacero.

Considerando las características físicas y la composición química de los residuos de flotación y gravimetría estudiados se pueden considerar que son materiales muy contaminados de acuerdo con los niveles que se establecen para residuos.

La erosión eólica presenta tres particularidades en la zona: 1) el área ocupada por los lodos de flotación (2,18 km²) representa casi el 25% del total (8,83 km²) de residuos mineros. 2) el hecho de que más del 10% del volumen total de lodos de flotación presenten una granulometría inferior a 10 micras, genera el riesgo de que puedan ser erosionadas y transportadas por el aire y, al ser muy ricos en metales pesados, pueden afectar la salud de la población. 3) los procesos de oxidación de los sulfuros en la superficie y taludes de las balsas de flotación y de gravimetría da lugar a unas eflorescencias y costras de sulfatos ricas en metales pesados que, al ser deshidratadas por la fuerte evaporación, dan lugar a un polvo muy fino y de muy baja densidad que es arrancado y transportado por el aire a grandes distancias, como lo demuestran las concentraciones de metales detectadas en las aguas de lluvia.

La existencia y desarrollo de las grietas por desecación en las balsas de lodo de flotación constituyen vías preferenciales de flujo de extraordinaria importancia, que condicionan el régimen de infiltración de las aguas, que hay que tener en cuenta en el diseño de las medidas correctoras a aplicar en la construcción de los depósitos de residuos, así como en la gestión y monitoreo de los residuos sólidos de los procesos minero-metalúrgicos.

De acuerdo a los diferentes tipos de riesgos existentes, en el área de estudio se han diferenciado seis zonas de riesgo ambiental (ver Figura 8.14). La Zona I “Castillo de San Julián” que ocupa 2,44 km²; la Zona II “La Parreta” de 0,90 km²; la Zona III “Llano

del Beal-La Unión-Portman” con 48,78 km²; Zona IV “Huerto de las Calesas” de 0,28 km²; Zona V “Las Cobaticas” con 0,32 km² y la Zona VI “Cala Reona” con 2,39 km²

10.8. CONCLUSIÓN GENERAL

De acuerdo a la caracterización integral del medio físico, objeto de nuestro estudio y el análisis de la información climática, geológica, hidrogeológica y de los tipos de residuos, se puede concluir que el impacto y riesgo ambiental de los RMM de la SM está controlado y condicionado por las formas en que se desarrolla el flujo y transporte de sustancias contaminantes en la zona, de las que se pueden diferenciar tres vías principales: I) la escorrentía superficial, II) el transporte y deposición por el viento y III) el flujo subterráneo del agua.

I) La escorrentía superficial tiene un carácter intermitente, sus efectos son considerables pues se produce en corto periodo de tiempo, debido al carácter torrencial de las precipitaciones. El aporte de sedimentos, sales y metales en suspensión que se produce por la escorrentía superficial, afecta fuertemente los ecosistemas del Mar Menor y el Mar Mediterráneo y las áreas de inundación de las ramblas, fundamentalmente en la desembocadura. Entre los principales contaminantes que transportan las aguas superficiales se encuentran los sulfatos, compuestos metálicos en disolución (Pb, Zn, Cd, Mn y Fe) y partículas sólidas en suspensión. El principal efecto se aprecia en las zonas de inundación de las ramblas y el Mar Menor donde el sedimento del fondo marino presenta concentraciones elevadas de Pb, Cd, Zn, Mn y Fe. La zona costera del Mar Mediterráneo en el área de estudio, está contaminada por el vertido directo de los lodos de flotación en la Bahía de Portman.

II) El transporte eólico se desarrolla durante todo el año y provoca el aporte de sales ricas en Pb, Cd, Zn, Cu, Ni, sulfatos y partículas sólidas a distancias considerables, provocando su deposición sobre el suelo y el medio marino en toda la zona de la Sierra y su radio de influencia. Para verificar el efecto del transporte y deposición que desarrolla el viento se realizó un control del volumen de precipitación atmosférica y su composición química en dos estaciones meteorológicas. Los análisis reflejan la existencia de concentraciones elevadas de metales (Pb, Cd, Zn, Cu y Ni) y sulfatos. El aporte de partículas ricas en sulfatos y metales a la atmósfera proviene fundamentalmente de las balsas de lodos o RMM, derivados de los procesos minero-metalúrgicos de flotación, compuestos entre el 4 y 10% de partículas finas (menores de 10 micras).

III) El flujo subterráneo tiene un efecto más local, pues la permeabilidad de los materiales es baja. Se ha comprobado que debido al impacto ambiental de las actividades mineras y a la infiltración de los lixiviados de las escombreras de residuos, existentes en la superficie del terreno del área estudiada sin ningún tipo de

impermeabilización, ha provocado la contaminación de las aguas subterráneas con diferentes metales (Mg, Pb, Cd, Zn, Mn, Sr y Fe) y sulfatos. La infiltración de las aguas meteóricas en los residuos mineros de flotación esta favorecida por la existencia de grietas de desecación y planos de estratificación, con intercalación de capas de diferente granulometría. El flujo subterráneo del agua esta controlado por la tectónica, las características de los materiales geológicos, las galerías y pozos mineros.

10.9. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

De acuerdo con los resultados de esta investigación se han abierto nuevas interrogantes que permiten establecer diferentes líneas de investigación, de las que algunas de ellas se encuentran en vías de desarrollo o lo serán a corto plazo, y otras que lo harán a medio o largo plazo. Las líneas de investigación propuestas son las siguientes:

- Continuar con el estudio de los procesos y características geoquímicas de los residuos minero-metalúrgicos, con el objetivo de poder profundizar en este aspecto controlando otras variables como son los posibles cationes intercambiables y, poder establecer y diferenciar dentro de la matriz del medio poroso las fases minerales que desempeñan el papel principal en la generación de contaminantes.
- Estudiar “*in situ*” las propiedades hidromecánicas de los residuos mineros y la posibilidad de realizar ensayos de flujo y transporte de soluto en condiciones de campo.
- A partir de los resultados de la tesis, sería interesante modelar numéricamente el flujo y el transporte de metales en el acuífero. El objetivo sería poder ajustar las concentraciones de los diferentes solutos medidos en las aguas subterráneas, para poder predecir la evolución espacio temporal en el sistema acuífero. Para esto no es posible usar modelos convencionales, es necesario el empleo de modelos concretos para este tipo de acuíferos, de los que se conoce existen algunos en EUA e Inglaterra.
- Considerando el estado actual de la contaminación de las aguas subterráneas, es necesario establecer el control en una serie de pozos para obtener muestras de agua en los sectores más afectados y controlar la evolución espacio temporal de la contaminación.
- Desarrollar la línea de investigación para utilizar residuos con pH alcalino, procedentes de las industrias mineras y del mármol, en la neutralización de aguas ácidas y la adsorción de metales.
- Realizar un estudio detallado que permita delimitar las posibles fuentes naturales y antrópicas del arsénico y la presencia y niveles de concentración del arsénico en el agua subterránea, debido a que, estudios preliminares a este trabajo, muestran la existencia de

este elemento en algunas zonas concretas del área de estudio. Además, sería interesante estudiar su posible presencia en la deposición atmosférica.

- Estudio específico de la unidad hidrogeológica de la Sierra de Cartagena-La Unión y su relación hidráulica con la del Campo de Cartagena. Para ello es necesario el desarrollo de estudios espacio temporal de la evolución del nivel piezométrico, de la composición química, y la aplicación de estudios isotópicos y modelos numéricos, acompañado de un estudio geológico de detalle.

- Estudio de la dispersión de metales que produce el viento y sus efectos sobre la composición de la lluvia y el suelo. El estudio debe incluir la evaluación del ciclo geoquímico del Pb, Zn y Cd en la zona de la Sierra de Cartagena-La Unión y su área de influencia, con vistas a precisar las formas geoquímicas en que se mueve.

- Estudio de restauración, planificación y ordenación ambiental de dos cuencas hidrográficas de ramblas: una que vierta al Mar Menor y otra al Mar Mediterráneo. El objetivo es experimentar diferentes medidas correctoras y escoger la de mejores resultados para su aplicación en toda el área.

- Realizar el estudio detallado de las características estratigráficas y geomorfológicas de las balsas de lodos. Esto constituye un tema prácticamente desconocido en la literatura científica.

- Continuar el estudio de la tasa de erosión en las balsas de lodos y establecer un modelo de erosión superficial para las cuencas hidrográficas de la región.

- Estudiar y diferenciar el aporte de sedimentos proveniente de la erosión de los residuos mineros de los de las zonas agrícolas y los de las áreas deforestadas. Para realizar esto es necesaria la implementación de parcelas de similares características en cada área en concreto.

- Teniendo en cuenta las características geológicas, tectónicas y sismotectónicas de la zona, donde se han registrado sismos de hasta 5 grados de magnitud (ver Capítulos 2 y 8); las propiedades físico-mecánicas de los residuos mineros; el hecho de que existan antecedentes en la licuefacción y rotura de balsas de residuos (balsa "Brunita" 1972); y la existencia de hundimientos en zonas de galerías mineras (ver Capítulo 8), se considera oportuno y necesario el estudio del riesgo sísmico en las balsas de residuo y en las zonas de mayor densidad de pozos mineros, particularmente en áreas próximas a núcleos urbanos.

- En cuanto a los residuos minero-metalúrgicos sólidos se considera que es necesario trabajar en la búsqueda de una posible aplicación industrial debido a la elevada

concentración que presentan en diferentes tipos de metales de riesgo potencial para el medio ambiente.

- Estudiar la viabilidad de desarrollar sobre las balsas de residuos la rehabilitación con plantas autóctonas que sean capaces de colonizar el sustrato.
- Hacer un estudio de la vegetación asociada a las balsas de lodo, con el objetivo de identificar las plantas bioindicadoras con vista a su posible utilización en la rehabilitación de zonas contaminadas por estos metales, y su posible utilización en las balsas carentes de vegetación.
- Desarrollar, en colaboración con aquellas instituciones públicas relacionadas con el tema de minería y medio ambiente, un programa sobre la metodología de inventario de pozos mineros y su posible utilización, en estudios de impacto ambiental en regiones mineras para definir las áreas de mayor riesgo.
- Transformar todas las bases de datos creadas para realizar esta tesis, en un S.I.G (G.I.S.) con el fin de poder elaborar mapas de las distintas variables ambientales, que faciliten los estudios de planificación y ordenación del territorio de la Sierra Minera.
- Utilización de los parámetros físicos, mecánicos, hidrogeológicos y químicos, obtenidos en el estudio y caracterización de los residuos, para la ordenación del territorio y en el diseño, construcción y aplicación de las medidas de restauración y ordenación de las balsas de lodos y escombreras, para la mejora de la gestión y monitoreo de éstos.
- Establecer itinerarios de interés geológico para la actividad turística de la Región. Este aspecto es de gran importancia, pues forma parte del patrimonio geólogo-minero y cultural de la región.
- Se considera que los resultados alcanzados con las metodologías usadas en este trabajo pueden ser aplicables a diferentes áreas de la Región de Murcia y de España. Entre ellas se encuentran Mazarrón (Murcia), las Herrerías (Almería), la Faja Pirítica (Huelva), etc.

REFERENCIAS

REFERENCIAS

- Abollino Ornella, Aceto Maurizio, Malandrino Mery, Meutasti Edoardo, Sarzanini Corrado y Barberis Renzo. (2002). Distribution and mobility of metals in contaminated sites. Chemometric investigation of pollutant profiles. *Environmental Pollution* 119: 177-193.
- Adriano, D.C. (1995). Trace elements in the terrestrial environment, Publicado por Springer-Verlag New York, segunda edición. 517 pp.
- Aguilera, F. (1998). Estudio preliminar de la hipoacusia inducida por ruido en la fábrica Moa Níquel S.A.. Conferencia internacional de aprovechamiento racional de los recursos minerales. 6.
- Alabert, J. (1973). La province plombo-zincifère des cordilleres betiques (Espagne meridional). Essai typologique. Thèse Univ. de Nancy.68-133.
- Álcaráz Ariza, FJ., Sánchez-Gómez, P. y Correal, E. (1989). Catálogo de las plantas aromáticas, condimentarias y medicinales de la Región de Murcia. Monografía inia-mapa, nº 67, Madrid. Andujar.
- Alcaraz Ariza, F. J. (1999). Manual de teoría y prácticas de geobotánica. Dm, Murcia, 401 pp.
- Alcaraz Ariza, F. J. et al., (2000). Aproximación a la diversidad de la flora vascular de la región de Murcia. En Calvo, J. F., Esteve, M. A. y López Bermúdez, F. (coord.) Biodiversidad. Contribución a su conocimiento y conservación en la región de Murcia. Universidad de Murcia (Murcia). 27-37.
- Álvarez, R., Verdeguer, M., Bouquet, A. (1982). Nueva metodología para el cálculo de contaminación por polvo, producida por un centro industrial, *Ciencia de la Tierra y del Espacio*, 5, 101-104.
- Ambiental, S.L., (1997). Plan de recuperación del águila perdicera en la Región de Murcia. C.M.A.A.A. Dirección General del Medio Ambiente. Tomo I: Descripción, inventario y biología de la población de la especie. 119 pp.
- Anketell, J.M.; Cegla, J. y Dzulynski, S. (1970). On the deformation structures in systems with reserves density gradients. *Recznik. Polak. Twarz. Geol.* Vol. 40. 3-30.

- Antolinos, J.A., Arana, R. y Soler, B. (2002). Aspectos arqueológicos y geológicos de una cantera romana en la rambla de Trujillo (Sierra de Cartagena, Murcia, España). Actas do Congresso Internacional sobre Património Geológico e Mineiro. Lisboa. 21-36.
- Arana, R. y Pérez, C. (1981). Estudio mineralógico de unas escorias romanas del horno de Herrerías (Mazarrón, Murcia). Bol. Soc. Esp. Mineralogía, 5. 15-27.
- Arana, R., Rodríguez, T., Mancheño, MA. y Ortiz, R. (1992). Lugares de interés geológico de la Región de Murcia. Ed: Agencia Regional para el Medio Ambiente y la Naturaleza. Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. 219 pp.
- Arana, R., Rodríguez, T., Mancheño, MA., Guillén, F., Ortiz, R., Fernández, MT. y del Ramo A. (1999). El Patrimonio Geológico de la Región de Murcia. Fundación Seneca. 399 pp.
- Arana Castillo, R. (2004). El Patrimonio Mineralógico de la Región de Murcia. V Reunión Nacional de la Comisión de Patrimonio Geológico. Molina de Segura (Murcia). Edts: Guillén y del Ramo. 17-40.
- Arribas, A. (1980). Distribución geoquímica de los elementos trazas de los yacimientos españoles del tipo BGPC. Fundación Juan March. Madrid. Serie Universitaria. V 146. 54 pp.
- Arribas, A., Espinosa, J. y Moro, M.C. (1983). Distribución de elementos trazas en las escaleritas y galenas de las mineralizaciones españolas asociadas con rocas volcánicas. Tecniterrae. Madrid. V. 55. 12-40.
- Arribas, A., Moro, M.C., Ovejero, G. y Santiago, L. (1984). El Sn asociado al subvolcanismo Neógeno de La Crisoleja, Sierra de Cartagena (Cordilleras béticas). I Congreso Español de Geología, tomo II, 403-414.
- Arribas Rosado, A. y Arribas Moreno, A. (1995). Caracteres metalogénicos y geoquímica isotópica del azufre y el plomo de los yacimientos de minerales metálicos del sureste de España. Bol. Geol. y Min. de España. Vol 106-1 año. 23-62.
- ATSDR (Agency for toxic substances and disease registry). Minimal risk levels for hazardous substances (MRLs). <http://www.atsdr.cdc.gov/mrls.html>
- Auernheimer, C., Llavador, F., y Pina, J.A. (1984). Chemical minority elements in bivalve shells. A natural model (Mar Menor, Spain). Arch. Sc. Genève. Vol 37, fasc. 3. 317-331.

- Auernheimer, C y Chinchon, S. (1997). Calcareous skeletons of sea urchins as indicators of heavy metals pollution. Portman Bay, Spain. *Environmental Geology* 29 (1/2). 78-83.
- Bell, F.G.; Stacey, T.R. y Genske, D.D. (2000). Cases and solutions: Mining subsidence and its effect on the environment: some differing examples. *Environmental Geology*. Abstract Volume 40 Issue 1/2. 135-152.
- Bello García A., Ordiers, J.B, y González Nicieza,C. (1995). Predicción de la subsidencia minera. *Anales de Ing. Mecánica*, año 10, nº 3. Valencia. 637-644.
- Bellon, H. (1976). Séries magmatiques Néogènes et Quaternaires du pourtour de la Méditerranée occidentale, comparées dans leurs cadre géochronométrique. Thèse Univ. de Paris-sud, Centre d'Orsay, 367 pp.
- Bellon, H., Bordet, P. y Montenat, C. (1983). Chronologie du magmatisme néogène des Cordillères bétiques (Espagne méridionale). *Bulletin Societé géologique de France*, 7 : 205-217.
- Benito, G., Benito-Calvo, A., Gallart, F., Martin-Vide, J.P., Regües, D. and Blade, E. (2001). Hydrological and geomorphological criteria to evaluate the dispersion risk of waste sludge generated by the Aznalcóllar mine spill (SW Spain) *Environmental Geology*, 40(4-5), 417-427.
- Berrocal, M^a.C. (1992/93). Catálogo de bienes muebles e inmuebles de la Sierra Minera de Cartagena-La Unión. Instituto de Patrimonio. Dirección General de Cultura de la Comunidad Autónoma de Murcia.
- Berrocal, M^a.C. (1996). Sierra Minera de Cartagena-La Unión: expoliación y desaparición de un singular paisaje minero. Actas de la 1^a sesión científica sobre patrimonio geológico y minero.
- Berrocal, M^a.C. (2003). El Patrimonio minero de la sierra de Cartagena-La Unión. Criterios y propuestas para su dinamización. III Congreso Internacional sobre Patrimonio Geológico y Minero. Cartagena. Eds: Rábano, I., Manteca, I. y García, C. 21-29.
- Berrocal, M.C., Manteca, J.I. y **García, C.** (2004). Catálogo de Bienes Culturales y Naturales de la Sierra Minera de Cartagena-La Unión. Consejería de Cultura de la Comunidad Autónoma de Murcia.

- Blight, G. E. (1994). Environmentally acceptable tailing dams. First International Congress on Environmental Geotechnics. Edmonton. Canada. 417-12.
- Blowes, D.W., Jambor, J.L., Apleyard, E.C. and Cherry, J.A. (1992). Temporal observations of the geochemistry and mineralogy of a sulfide-rich mine tailings impoundment, Heath Steel Mines, New Brunswick, *Exploration Mining Geol.*, 1 (3) 251-254.
- Botella y Hornos, F. (1868). Descripción Geológica-Minera de las provincias de Murcia y Albacete. 186 pp.
- Bouma, A.H. (1962). Sedimentology of some flysch deposits. *Elsevier*. Amsterdam. 168 p.
- Brake, S.S., Dannelly, H.K. and Connors, K.A. (2001). Control on the nature and distribution of an alga in coal mine waste environment and its potential impact on water quality, *Environmental Geology*, 40(4-5), 458-469.
- Bravo Villasante, F. (1912). Criaderos de hierro de España. Inst. Geol. de España. Tomo I. 544 pp.
- Burriel, F., Lucena, F., Arribas, S., y Hernández, J. (1985). Química analítica cualitativa". Ed. Paraninfo. 1050 pp.
- Carménate, J.A. y Riverón, A.B. (1999). Zonificación de los fenómenos geológicos que generan peligros y riesgos en la ciudad de Moa. *Minería y Geología*, 24 (2), 21-31.
- Carrión, A. y Vilar, J. (1995). Estudio de la actividad geomínica en el grupo La Parreta (Alumbres-Cartagena). Proyecto Fin de carrera dirigido por **Cristóbal García**. 86 pp.
- Carulla Gratacos, N. (1977a). Contribución al conocimiento de la dinámica hidrogeológica en clima semiárido (Depresión de Vera, Almería). Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Barcelona, 373 pp.
- Carulla Gratacos, N. (1977b). Estudio Hidrogeológico del sector sur de la sierra de Cartagena para el abastecimiento de agua no salobre al lavadero Roberto. Trabajo para la empresa S.M.M.P.E. Inédito. 32 pp.
- Carvajal, D.J., González, A. y Romero, E (2002). El patrimonio geológico y minero, un importante factor a considerar en el cierre de minas. Actas do Congresso Internacional sobre Património Geológico e Mineiro. Lisboa. 239-245.

- CEBAS (Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura) (1970). Estudio Hidrogeológico en los alrededores de Escombreras, Cartagena (Murcia). 39 pp.
- Collado Fernández, D.M. (2002). Movilización de contaminantes en el terreno a partir de suelos contaminados. Tesis doctoral. Universidad de Almería, 262 pp.
- Committee on Earthquake Engineering (1985). Liquefaction of soils during earthquakes, National and Academy Press, Washington, 240 pp.
- Conesa García, C. (1989). La acción erosiva de las aguas superficiales en el Campo de Cartagena. Universidad de Murcia: dpto de Geografía, Física, Humana y análisis Regional. Caja Murcia. Caja Ahorros de Murcia. 137 pp.
- Conesa García, C. (1990). El Campo de Cartagena, Clima e Hidrología de un medio semiárido. Universidad de Murcia, Ayuntamiento de Cartagena, Comunidad de regantes del campo de Cartagena. 450 pp.
- C.H.S. (Confederación Hidrográfica del Segura) (1991). Estudio hidrogeoquímico sobre la influencia del vertido a la corta Tomasa en la zona Llano del Beal-Portman. 30 pp.
- C.A.A.M.A. (Consejería de Agricultura Agua y Medio Ambiente de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia) (1999a). Mapa digital de Suelos de la Región de Murcia. 78 pp.
- C.A.A.M.A. (Consejería de Agricultura Agua y Medio Ambiente de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia) (1999b). Guía ambiental de la minería en la Región de Murcia. 279 pp.
- C.A.A.M.A. (Consejería de Agricultura Agua y Medio Ambiente de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia) (2002). Figuras de Protección de Áreas con interés Natural en la Región de Murcia. 42 pp.
- C.M.A.A.A. (Consejería de Medio Ambiente, Agricultura y Agua de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia), (1998). Parque minero y ambiental Cabezo Rajao. Una propuesta para su recuperación. 83 pp.
- C.P.T.O.P. (Consejería de Política Territorial y Obras Públicas de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia) (1995). Directrices de Ordenación Territorial. Portman y Sierra Minera. 289 pp.

C.O.P.V.T. (Consejería de Obras Públicas, Vivienda y Transportes de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia). **García, C.** et al., (2002). Estudio sobre canteras de áridos para hormigones y viales en la Región de Murcia. 263 pp.

C.P.T.O.P. (Consejería de Política Territorial y Obras Públicas de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia) (1998). Canteras de áridos para hormigones en la Región de Murcia. 185 pp.

Constitución Española, (1978). Artículos : 9 ; 45 ; 148; 149.1.23;

Corrales, I.; Rossell, J.; Sánchez de la Torre, L.; Vera, J.A. y Vilas, L. (1977). Estratigrafía. Ed. Rueda. Madrid. 718 pp.

Custodio, E. (1983). Hidrogeoquímica. Hidrología subterránea. Editorial Omega. Segunda edición. Barcelona. Vol (1) 1003-1095.

Custodio, E. y Llamas, M.R. (1996). Hidrología subterránea. Tomos I y II. Ed. Omega, Barcelona. 2350 pp.

De Juan, D., Meseguer, V. Y Lozano, L.J. (1998). Impacto hidrológico del cierre de minas. El caso de la sierra minera de Cartagena y La Unión. Rev. Ing. Química, mayo, 1998. 195-197.

De la Fuente, C., Martínez, S. y Queralt, I. (1982). Estudio mineralógico de los materiales basales de las unidades alpujárrides inferiores de la Sierra de Cartagena. Bol. Soc. Esp. Mineralogía, 5. 191-194.

De León, A.R., Guerrero, J. y Farazo, F. (1982). Evolution of the pollution of the coastal lagoon of Mar Menor. VI^{es} Journées Étud. Pollutions, Cannes, C.I.E.S.M. 355-358.

Decreto 45/1995, de 26 de mayo, por el que se aprueba el Plan de Ordenación de los Recursos Naturales de Calblanque, Monte de las Cenizas y Peña del Águila. B.O.R.M. nº 152, de 3 de julio de 1995.

Decreto 46/1995, de 26 de mayo, por el que se aprueban definitivamente las directrices de ordenación territorial de la Bahía de Portman y de la Sierra Minera. B.O.R.M. nº 160, de 12 de julio de 1995.

Deheyn, D., Jangoux, M., y Warnau M. (2000). Alteration of bioluminescence in *Amphipholis aquamat* (Ohhiuroidea: Echinodermata) by heavy metals

- contamination: a field study. *The science of the total environment* 247. Elsevier. 41-49.
- Díaz del Río, V. (1993). Estudio geoambiental del Mar Menor. Monografías del Instituto Español de Oceanografía, nº 4. Madrid. 223 pp.
- DIN 38414-S4, German standards methods for the examination of water, waste water and sludge; group S (sludge and sediments); determination of leachability by water (S4).
- Directiva 98/83/CE del Consejo, de 3 de noviembre de 1998, relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano. Diario oficial de las Comunidades Europeas. L330/32, ES, de 5-12-1998.
- Domergue, C. (2003). Nuestros conocimientos de la minería romana en Cartago Nova, frente a los proyectos de “regeneración” de la sierra de Cartagena. Patrimonio geológico y minero y desarrollo regional. III Congreso Internacional sobre Patrimonio Geológico y Minero. Cartagena Eds: Rábano, I., Manteca, I. y García, C. 3-13 pp.
- Dzulynski, S y Walton, E.K. (1965). Sedimentary feature on flysch and greywackes. nº 5 de la serie Develop. in Sediment. Elsevier. Amsterdam, 274 p.
- Egea, P.M. (2003). La minería contemporánea en la sierra minera de Cartagena-La Unión. III Congreso internacional sobre patrimonio geológico y minero. Cartagena. Eds: Rábano, I., Manteca, I. y García, C. 31-42.
- Einsele, G. (1982). Sedimentary basins. Evolution, facies and sediment budget. Springer-Verlag. 628 p. Berlín.
- Elberling, B. and Nicholson, R. V. (1996). Field determination oxidation rates in mine tailings. *Water Resources Research*. 32 (6), 1773-1784.
- ENADIMSA (Empresa Nacional Adaro de Investigaciones Científicas, S.A.) (1988a). Estudio de Restauración del Medio Ambiente Afectado por las Actividades Mineras en el Sureste de Murcia. Estudio Hidrogeológico. Dirección General de Minas de la Comunidad Autónoma de Murcia. 31 pp.
- ENADIMSA (Empresa Nacional Adaro de Investigaciones Científicas, S.A.) (1988b). Estudio de Restauración del Medio Ambiente Afectado por las Actividades Mineras en el Sureste de Murcia. Estudio Geotécnico. Balsas y Escombreras. Dirección General de Minas de la Comunidad Autónoma de Murcia. 102 pp

Espinosa Godoy, J., Martín-Vivaldi, J.M. y Pérez Rojas, A. (1974). Mapa geológico de España. E. 1:50.000, hojas 977 (Cartagena) y 978 (Llano del Beal). I.G.M.E. Madrid.

Ewers, U., (1991): Standards, Guidelines and Legislative Regulations Concerning Metals and their Compounds. In *Metals and their Compounds in the Environment*, ed. E. Merian. VCH, Weinheim, 687-711.

FAO-ISRIC. (1990): Guidelines for soil description. 3rd Edition. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma. 70 pp.

Faz, A., Aracil, E., Acosta, JA., Alcaráz, M., Conesa, H., García, G., **García, C.**, Manteca, JI., Martínez, I., Martínez, P., Martínez, MA., Peñas, JM., Rodríguez, T., Rodríguez, P. y Trigueros (2003a). Evaluación de riesgo y definición de medidas correctoras en depósitos de lodos abandonados procedentes de procesos de actividad extractiva en la Región de Murcia. Aplicación al depósito “El Lirio”. Consejería de Economía, Industria e Innovación, de la Comunidad Autónoma de Murcia. Dirección General de Industria, Energía y Minas (contrato No 0978-1-0026). 243 pp.

Faz, A., Aracil, E., Acosta, JA., Alcaráz, M., Conesa, H., García, G., **García, C.**, Manteca, JI., Martínez, I., Martínez, P., Martínez, MA., Peñas, JM., Rodríguez, T., Rodríguez, P. y Trigueros (2003b). Evaluación de riesgo y definición de medidas correctoras en depósitos de lodos abandonados procedentes de procesos de actividad extractiva en la Región de Murcia. Aplicación al depósito “Brunita”. Consejería de Economía, Industria e Innovación, de la Comunidad Autónoma de Murcia. Dirección General de Industria, Energía y Minas (contrato No 0978-1-0026). 250 pp.

Faz, A., Martínez-Martínez, S., Acosta, J.A., Peñas, J.M., Aracil, E., Alcaraz, M., Conesa, H., García, G., **García, C.**, Manteca, I., Martínez, P., Martínez, M.A., Rodríguez, T., Rodríguez, R. and Trigueros, E. (2004). Risk assesment and restoration posibilitéis of some abandoned mining silt ponds in the region de Murcia: study case “El Lirio”. Fourth internacional conference on Land degradation. Cartagena. p 357.

Fernández, R. (1978). El agua en la minería y obras subterráneas. Tomos I, II y III. Talleres Are, Granada España, 1539 pp.

Fernández, R. (1981). Efectos sobre las aguas subterráneas de las actividades mineras, medidas de prevención. Jornadas sobre análisis y evolución de la contaminación de las aguas subterráneas en España. 579-601.

- Fernández-Rubio, R., Fernández, S. y Esteban, J. (1986). Abandono de minas. Impacto hidrológico. Cátedra de hidrología. E.T.S. Ingenieros de Minas. Madrid. IGME. Serie Minería y seguridad minera. 267 pp.
- Fernández, R. (1998a). Aznalcóllar-Doñana: luces y sombras. *Industria y Minería*, 33, 57-59.
- Fernández, R. (1998b). Clausura de minas, impactos hidrológicos. Reunión científico técnica sobre el agua en el cierre de minas. Oviedo España. Material de la reunión.
- Font Tullon, I. (1983). Atlas climático de España y Portugal. Instituto Nacional de Meteorología. Madrid.
- Friedrich, G. (1962). Über ein dem Greenalit maestebendes mineral der Serpentinegruppe aus den subvulkanischen hydrothermalen erzvorkommen der Sierra de Cartagena in Spanien. *Beitr. Mineralogie Petrographie*, v.8, 189-198.
- Friedrich, G. (1964). Lagerstättenkundliche untersuchungen an der erzvorkommen der Sierra de Cartagena in Spanien. *Geol. Jahrb. Beiheft* 59, 108 pp.
- Fundación Sierra Minera (2001). Medio Ambiente y Empleo en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión. Proyecto ARAAR. Edit: Fundación Sierra Minera. La Unión. 256 pp.
- Gambín, A. y García, A. (1997). Aportaciones al proyecto de parque geomínero en la sierra de Cartagena. U.P.C.T. Proyecto Fin de carrera dirigido por **Cristóbal García**.
- García, C.**, Hoz, P., Jiménez, A.D., López, R. y Puche, A.J. (1978). Estudio Hidrogeológico El Descargador-Llano del Beal, Sector norte de la sierra de Cartagena-La Unión. 109 pp.
- García, C.** y Jiménez, A.D. (1984). Estudio Hidrogeológico Hacienda la Cruz. Cartagena. Inédito. 34 pp.
- García, C.**, Gambín, A. y García, A. (1997). Inventario de restos arqueoindustriales y pozos mineros en la sierra de Cartagena-La Unión Murcia). *Minería y Siderurgia*, nº 18. 51-59
- García, C.**, Manteca, J.I. y Rodríguez, T. (1997). Estudio Geológico e Hidrogeológico Mina Regente (El Gorguel-Cartagena) para el emplazamiento del nuevo depósito de R.S.U. de Cartagena. Trabajo para la empresa Lhicsarsa. 60 pp.

- García, C., Manteca, J.I. y Rodríguez, T. (2001).** Inventario de Pozos Mineros de la Región de Murcia (Sierra de Cartagena). Consejería de Tecnologías, Industria y Comercio de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. 13 pp.
- García, C. y Manteca, J.I. (2002).** Metodología para la realización de inventario de pozos mineros. Aplicación a la Sierra de Cartagena-La Unión. Actas do II Congresso Internacional sobre Património Geológico e Mineiro. Lisboa. 435-450.
- García, C. et al., (2003 a).** Estudio sobre canteras de áridos para hormigones y viales en la Región de Murcia Año 2002. Consejería de Obras Públicas, Vivienda y Transportes de la CARM. 263 pp.
- García, C., Manteca, J.I. y Queralt, I. (2003 b).** Caracterización e inventariado de los depósitos de residuos mineros en la Sierra de Cartagena (Murcia). Actas del IV Congreso Internacional sobre Patrimonio Geológico y Minero. Utrillas (Teruel). 519-530 pp.
- García, C., Robles-Arenas, V.M., Peñas, J.M. and Rodríguez, R. (2004 a).** Mine land degradation in the Sierra Minera of Cartagena-La Unión: environmental impact in groundwater. Fourth international conference on land degradation. Cartagena. p 348.
- García, C., Robles-Arenas, V.M.; Peñas, J.M. y Rodríguez, R (2004 b).** El riesgo ambiental de los residuos minero-metalúrgicos de la Sierra de Cartagena-La Unión (Murcia, España). III Congreso de la Naturaleza de la Región de Murcia. Sangonera la Verde-Murcia. Octubre 2004. Libro resumen. p 6.
- García, A.J., Meseguer, V. y Lozano, L.J. (1986). Impacto hidrológico del cierre de minas. El caso de la Sierra Minera de Cartagena y La Unión. Ingeniería Química. 195-197.
- García, G. y Muñoz, A (2003). Parque minero “Sierra y Bahía”: Propuesta de la fundación Emma Egea para la creación de un parque minero en la sierra minera de la Unión y Bahía de Portman (Murcia). III Congreso Internacional sobre Patrimonio Geológico y Minero. Cartagena. Eds: Rábano, I., Manteca, I. y García, C. 601-609.
- García, G., Manteca, J.I. y Faz, A. (2003). Riesgos y calidad ambiental de los terrenos del antiguo distrito minero de La Unión-Cartagena, Murcia. III Congreso Internacional sobre Patrimonio Geológico y Minero. Cartagena. Eds: Rábano, I., Manteca, I. y García, C. 301-306.

- García, G., Faz, A. y Conesa, H.M. (2003). Selection of autochthonous plant species from Spain for soil lead phytoremediation purposes. *Water, Air and Soil Pollution: Focus*, 3: 243-250.
- García Tortosa, FJ., López-Garrido, A. y Sanz de Galdeano, C. (2000). Présence du complexe tectonique Malaguide à l'est de Carthagène (zone interne Bétique, Espagne). *C.R. Acad.Sci.Paris, Sciences de la Terre et des planètes. Earth and Planetary Sciences* 330. 139-146.
- Gibert, J. y Pons-Moya, J. (1985). Estudio morfológico de la falange del género Homo de Cueva Victoria (Cartagena, Murcia). *Paleontología i Evolució*, XVIII.
- González, I. y Baños, P. (1987). Problemática de Portman. *Asociación de Naturalistas del Sureste. Murcia*. 88 pp.
- González, H, Torres, I. y Ramírez, M. (1995). Contaminación por metales pesados en la Bahía de Levisa, Cuba, *Minería y Geología*, 12 (1), 41-43.
- Gonzalez, H. y Ramirez, M. (1995): The effect of nickel mining and metallurgical activities on the distribution of heavy metals in Levisa Bay, Cuba. *Journal of Geochemical Exploration*. 52, 183-192.
- Gonzalez, H, Ramirez, M. and Torres, I. (1997): Impact of nickel and metallurgical activities on the distribution of heavy metals in sediments of Levisa, Cabonico and Nipe Bays, Cuba. *Environmental Geochemistry and Health*. 19, 57-62.
- Graeser, S. y Friedrich, G. (1970): De l'age et de la genese des gisements plombo-zinciferes de la Sierra de Cartagena, en Espagne. *Mineral. Deposita*, 5. 365-374.
- Gregurek, D., Melcher, F., Paulov, V.A., Reimann, C. and Stumpfl, E.F. (1999). Mineralogy and mineral chemistry on snow filter residues in the vicinity of the nickel copper processing industry, Kola Peninsula, NW Russia; *Mineralogy and petrology*, 65, 87-111.
- Guardiola, R. (1927). Estudio metalogénico de la Sierra de Cartagena. *I.G.M.E. Memoria*. v.53, 564 pp.
- Guillén, F. et al., (2004). Actuaciones de divulgación del Patrimonio Geológico y sus efectos en la sociedad y el medio natural de la Región de Murcia. V Reunión nacional de la comisión de Patrimonio Geológico. Molina de Segura (Murcia). Edts: Guillén y del Ramo. 145-154 pp.

- Hem, J.D. (1985). Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water, 3rd ed., U.S. Geol. Surv., Water Supply paper 2254, 263 p.
- Hernández, P. y Antolinos, J.A. (2002). Del patrimonio cultural a la arquitectura del paisaje: El proyecto Atabaire (Cartagena-España) como modelo de recuperación y puesta en valor de una cantera histórica. Actas do II Congresso Internacional sobre Patrimonio Geológico e Mineiro. Lisboa. 649-654.
- Hernández Bastida, J., García Fernández, G., Conesa Álvarez, H. y Faz Cano. A. (2004). Polluted soils by mining and industrial activities in the “Campo de Cartagena” county (Murcia). Scientific excursión, nº 3. Fouth internacional conference on land degradation. Scientific excursions guide book. Cartagena. Murcia, Spain. 85 pp.
- Hernando, J.L. (2003). Mineralúrgia y metalurgia no férrea en el sureste peninsular: Cartagena-Portman-La Unión (Murcia). III Congreso Internacional sobre Patrimonio Geológico y Minero. Cartagena. Eds: Rábano, I., Manteca, I. y García, C. 399-405.
- Hurlbut, C.S., Klein, C. (1989) Manual de mineralogía de Dana. Editorial Reverté, 3ª edición. Barcelona. 564 pp.
- Ibargüen J. y Rodríguez Estrella, T., (1996) Peligrosidad sísmica en la Región de Murcia. VI Cong. Nac. y Conf. Int. de Geología Ambiental y Orden. del Territ. Granada. 407-423.
- Ibargüen J. y Rodríguez Estrella, T. (2001). Sísmicidad reciente en la Región de Murcia durante el quinquenio 1994-1998. 1^{er} Cong. Nac. de Ing. Sísm. Murcia. T.II (Memoria postcongreso). 321-329.
- I.E.O. (Instituto Español de Oceanografía) (1983). Estudio de la contaminación de la bahía de Portman. Informe II. 113 pp.
- I.E.O. (Instituto Español de Oceanografía) (1984). Estudio de la contaminación de la bahía de Portman. Informe III final. Centro Oceanográfico “Mar Menor”. 56 pp.
- I.G.M.E. (Instituto Geológico y Minero de España) (1974a). Mapa geológico de España a escala 1:50.000. Hojas nº^{os} 977 Cartagena y 978 Llano del Beal. Espinosa, J.; Martín, J.M. y Pérez Rojas, A.
- I.G.M.E. (Instituto Geológico y Minero de España) (1974b). Inventario Nacional de Balsas y Escombreras. Murcia. 151 pp.

- I.G.M.E. (Instituto Geológico y Minero de España) (1979). Mapa Hidrogeológico Nacional. Explicación y mapas de lluvia útil, reconocimiento hidrogeológico y síntesis de los sistemas acuíferos. Varios autores.
- I.G.M.E. (Instituto Geológico y Minero de España) (1980). Calidad de las aguas subterráneas en la Cuenca Baja del Segura y costeras de Alicante” Primer Informe. V Sistema acuífero: Campo de Cartagena. 77 pp.
- I.G.M.E. (Instituto Geológico y Minero de España) (1985). Mapa Hidrogeológico de España a escala 1:200.000. Hoja nº 79 Murcia.
- I.G.M.E. (Instituto Geológico y Minero de España) (1986a). Inventario Nacional de Balsas y Escombreras. Murcia. 162 pp.
- I.G.M.E. (Instituto Geológico y Minero de España) (1986b). Manual para el diseño y construcción de escombreras y presas de residuos mineros. 182 pp.
- I.G.M.E. (Instituto Geológico y Minero de España) (1988). Mapa Minero de España. Escala 1:1 000 000. 120 pp.
- I.G.M.E. (Instituto Geológico y Minero de España) (1989). La sobreexplotación de los acuíferos. Almería 1989. Colección temas geológico-mineros.
- I.G.M.E. (Instituto Geológico y Minero de España) (1991). La sobreexplotación de los acuíferos. XXIII Congreso internacional de la AIM. Islas Canarias, 1991. Colección temas geológico-mineros.
- I.N.M. (Instituto Nacional de Meteorología) (1998). Memorándum climatológico descriptivo del aeródromo de San Javier. Centro Meteorológico Territorial de Murcia.
- I.T.G.E. (Instituto Tecnológico, Geominero de España) (1990). Mapa geológico de la plataforma continental española y zonas adyacentes. E-1:200.000. Hoja 79-79E Murcia. 1ª edición. Madrid. 146 pp.
- I.T.G.E. (Instituto Tecnológico, Geominero de España) (1992a). Jornadas sobre tecnología del agua en la minería.
- I.T.G.E. (Instituto Tecnológico, Geominero de España) (1992b). Las aguas subterráneas en España, informe de síntesis. 2ª edición.

- I.T.G.E. (Instituto Tecnológico, Geominero de España) (1993a). Mapa geológico de la Región de Murcia. E-1:200.000. Madrid. 105 pp.
- I.T.G.E. (Instituto Tecnológico, Geominero de España) (1993b). Mapa Neotectónico, Sismotectónico y de Actividad de Fallas de la Región de Murcia a escala 1:200.000. Edita: ITGE y CPTOP de la Región de Murcia. 99 pp.
- I.T.G.E. (Instituto Tecnológico, Geominero de España) (1994a). Las aguas subterráneas del Campo de Cartagena (Murcia). 66 pp.
- I.T.G.E. (Instituto Tecnológico, Geominero de España) (1994b). Las aguas subterráneas, importancia y perspectivas.
- I.T.G.E. (Instituto Tecnológico, Geominero de España) (1994c). Mapa geológico de la Región de Murcia a escala 1:200.000. Edita: ITGE y CPTOP de la Región de Murcia. Memoria. 105 pp.
- I.T.G.E. (Instituto Tecnológico, Geominero de España) (1994d). Mapa Guía del Medio Físico y Recursos Naturales de la Región de Murcia a escala 1:300.000. Edita: ITGE y CPTOP de la Región de Murcia.
- I.T.G.E. (Instituto Tecnológico, Geominero de España) (1994e). Ordenación de Territorio. Una aproximación desde el Medio Físico. Serie: Ingeniería Geoambiental. 238 pp.
- I.T.G.E. (Instituto Tecnológico, Geominero de España) (1994f). Mapa Guía del Medio Físico de Murcia.
- I.T.G.E. (Instituto Tecnológico, Geominero de España) (1995a). Atlas Inventario de Riesgos Naturales de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. Edita: ITGE y CPTOP de la Región de Murcia. 138 pp.
- I.T.G.E. (Instituto Tecnológico, Geominero de España) (1995b). Manual de reutilización de residuos de la industria minera, siderometalúrgica y termoeléctrica. Serie: Ingeniería Geoambiental. 308 pp.
- I.T.G.E. (Instituto Tecnológico, Geominero de España) (1996). Manteca Martínez, J.I. y **García García, C.** Estudio Geológico e Hidrogeológico para la recuperación ambiental de la bahía de Portman (La Unión-Murcia). Universidad de Murcia. 306 pp.

- I.T.G.E. (Instituto Tecnológico, Geominero de España) (1999a). Inventario Nacional de Balsas. Región de Murcia. 270 pp.
- I.T.G.E. (Instituto Tecnológico, Geominero de España) (1999b). Atlas del Medio Natural de la Región de Murcia.
- Jiménez, J.A. y De Justo, J.L. (1975). Geotecnia y cimientos I. Propiedades de los suelos y de las rocas. Editorial Rueda. Madrid. 466.
- Jiménez V. y Rodríguez, R. (1997). Restauración de terrenos degradados por la actividad minera a cielo abierto en el noreste de Holguín. Cuba. IV Simp. Nacional sobre taludes y laderas inestables. Granada.(España) Eds. Alonso, E., Corominas, J., Chacón, J., Oteo, C. y Pérez, J.
- JUNTA DE ANDALUCÍA (2000). Guía para el Diseño y Construcción de Presas de Residuos Mineros.
- Kabata-Pendias, A. y Pendias H. (1992): Trace elements in soil and plant (p.33): 365 pp.
- Kager, P.C.A. (1980). Mineralogical investigations on sulfides Fe-Mn-Zn-Mg-Ca carbonates, greenalite and associated minerals in the Pb-Zn deposits in the Sierra de Cartagena, province of Murcia, S.E. Spain. Thesis University Amsterdam. GUA papers of geology series 1, num.12. 203 pp.
- Larsen, F. and Postmant, D. (1997). Nickel mobilization in a groundwater well field released by pyrite oxidation and desorption from manganese oxides. Environmental Science and Technology, 31, 2589-5595.
- Ley 22/1973, de 22 de julio, de Minas.
- Ley 4/1989, de 27 de marzo, de Conservación de los Espacios Naturales y de la Flora y Fauna Silvestres. Arts. 13; 14; 16; 17; 45.2
- Ley 4/1992, de 30 de julio, de Ordenación y Protección del Territorio de la Región de Murcia. BORM nº 189, publicado el 14-8-1992. Art. 48
- Ley 1/1995, de 8 de marzo, de Protección del Medio Ambiente de la Región de Murcia. BORM nº 78, publicado el 13-4-1995.

- Lillo Carpio, M. y Rodríguez Estrella, T. (1996). Aspectos sobre la geomorfología del valle y ensenada de Escombreras (Murcia), Papeles de Geografía, nº 23-24. 193-210 pp.
- Linares, F. (2001). La crisis de la comarca minera de Cartagena-La Unión (1987-1991). Edita: Ayuntamiento de Cartagena. 295 pp.
- Linares, F. (2003). Más allá de la racionalidad técnica; El caso de la última crisis de la minería en la sierra de Cartagena (Murcia). III Congreso Internacional sobre Patrimonio Geológico y Minero. Cartagena. Eds: Rábano, I., Manteca, I. y García, C. 459-465 pp.
- López García, J.A. (1979). Estudio de los sulfuros de Fe de los yacimientos de La Unión (Sierra de Cartagena) y de su influencia en el tratamiento industrial. Tesis de Licenciatura. Univ. Complutense. Madrid.
- López García, J.A. y Lunar Hernández, R. (1983). Estudio mineralógico y geoquímica de la zona de alteración del Estrecho de San Ginés (Sierra de Cartagena-Murcia). Bol. Soc. Esp. de Mineralogía. 243-248.
- López García, J.A. (1985). Estudio mineralógico, textural y geoquímico de las zonas de oxidación de los yacimientos de Fe, Pb, Zn de la Sierra de Cartagena, Murcia. Tesis depto. Crist. y Mineralogía, Univ. Complutense. Madrid.
- López García, J.A., Manteca, JI. y Astudillo, J. (1986). Geoquímica de las zonas de oxidación de los yacimientos de Fe-Pb-Zn de la Sierra de Cartagena (SE. de España). Bol. Soc. Esp. de Mineralogía (1987), 9, 367-373.
- López García, J.A. (1987a). Estudio mineralógico, textural y geoquímica de las zonas de oxidación de los yacimientos de Fe-Pb-Zn de la Sierra de Cartagena (1ª parte). Boletín Geológico y Minero, T. XCVIII-IV. Año 1987. 527-543.
- López García, J.A. (1987b). Estudio mineralógico, textural y geoquímica de las zonas de oxidación de los yacimientos de Fe-Pb-Zn de la Sierra de Cartagena (2ª parte: oxidación de paragénesis con greenalita-magnetita). Boletín Geológico y Minero, T. XCVIII-V. Año 1987. 670-679.
- López García, J.A. (1987c). Estudio mineralógico, textural y geoquímica de las zonas de oxidación de los yacimientos de Fe-Pb-Zn de la Sierra de Cartagena (3ª parte: oxidación de paragénesis con sulfuros-carbonatos-sílice). Boletín Geológico y Minero, T. XCVIII-VI. Año 1987. 802-813.

- Lowe, D.R. (1975). Water escape structure in coarse-grained sediments. *Sedimentology*, Vol. 22. 157-204.
- Lunar, R., Manteca, J.I., Rodríguez, P. y Amorós, J.L. (1982). Estudio mineralógico y geoquímico del gossan de los depósitos de Fe, Pb, Zn de La Unión (Sierra de Cartagena). *Bol. Geol. y Min. T.XCIII-III*, 244-253.
- Llamas, J.F. (1998). Análisis geoquímico ambiental del accidente de Aznalcóllar. *Industria y Minería*, 33, 60-65.
- Mancheño, MA y Rodríguez, T. (1985). Geología de los diapiros triásicos en el noroeste de la provincia de Murcia. *Estudios Geológicos*. Vol.41. 189-200. Madrid.
- Manteca, J.I. (1974). Nota sobre las características mineralógicas de los yacimientos de la Sierra de Cartagena y su repercusión sobre el tratamiento por flotación. Informe interno. S.M.M.P.E.
- Manteca, J.I. (1991). Estimación de reservas minerales. Ed. Ramón Areces, S.A. *Yacimientos Minerales*. 885-906.
- Manteca, J.I. y Ovejero, G. (1992). Los yacimientos Zn, Pb, Ag-Fe del distrito minero de La Unión-Cartagena, Bética Oriental. Edit. C.S.I.C, Col. Textos Universitarios, Vol. 5, *Recursos Minerales de España*, pp.1085-1102.
- Manteca, J.I. y Ovejero, G. (1995). Estudio geológico de la zona de Escombreras (Sierra de Cartagena). Inédito.
- Manteca, J.I. y **García, C.** (1996). Estudio Geológico, Hidrogeológico y Geotécnico del complejo Nevado-Filábride de la zona de Alumbres (Sierra de Cartagena).
- Manteca, J.I., Berrocal, M.C. y **García, C.** (1996). Sobre la creación de un parque geominero y arqueoindustrial en La Unión (Murcia, como medida de protección y puesta en valor del patrimonio Histórico-Minero. I Sesión científica sobre patrimonio minero-metalúrgico de la SEDPGYM. Almadén. Libro de Comunicaciones.
- Manteca, J.I., **García, C.** y Ródenas, F. (1999a). Ruta minera carretera del 33. La Unión (Murcia). IV Sesión Científica de la Sociedad para la Defensa del Patrimonio Geológico y Minero. Universidad de Córdoba. Belmez, 1999. Libro de Comunicaciones, tomo I, 176-191.
- Manteca, J.I., Rodríguez, T. y **García, C.** (1999b). Estudio Geológico en relación con las grietas y hundimientos aparecidos en el polígono industrial Lo Tacón de La

Unión (Murcia). Trabajo para la Consejería de Obras Públicas y Ordenación del Territorio de la CARM.

Manteca, J.I., **García, C.** y Ródenas, F. (2000). Ruta minera carretera del 33. La Unión-Murcia. Excmo Ayuntamiento de La Unión. Concejalía de Turismo y Museos. 33 pp.

Manteca, J.I. y **García, C.** (2001). La falla de Cartagena-La Unión. Aportación a su conocimiento y verificación visual de su existencia gracias a una obra pública. V Reunión nacional de la comisión de Patrimonio Geológico. Molina de Segura (Murcia). Edts: Guillén y del Ramo.

Manteca, J.I., Rodríguez, T. y **García, C.** (2002). Estudio sobre el grado de contaminación de aguas y suelos de la finca Fundición Santa Lucía en Cartagena-Murcia. Trabajo para la empresa L.Q.M. Gestión Ambiental.

Manteca, J.I. y **García, C.** (2003). Valorización del patrimonio geológico y minero en La Unión-Murcia: Propuesta preliminar de adaptación de las antiguas minas Agrupa Vicenta y Remunerada para su uso turístico. Patrimonio geológico y minero y desarrollo regional. III Congreso Internacional sobre Patrimonio Geológico y Minero. Cartagena. Eds: Rábano, I., Manteca, I. y García, C. 593-600.

Manteca, J.I., **García, C.** y Rodríguez, R. (2004a). Caracterización petrográfica y química de las escombreras de óxidos (Gossan) de la Sierra de Cartagena-La Unión (Murcia-España) y evaluación de su riesgo ambiental. Congreso. En prensa.

Manteca, J.I., Rodríguez, T. y **García, C.** (2004b). Informe geológico y sismotectónico de la zona de emplazamiento del futuro hospital de Cartagena. Informe inédito. Cartagena, abril 2004.

Martín de Agar, MP. (1984). Ecología y planeamiento territorial: metodología y estudio de casos en la Región de Murcia.. Fac. Biología, dpto Ecología. Univer. Murcia. 57 pp

Martín, J.M. y Torres Ruiz. (1982). Algunas consideraciones sobre la convergencia de medios de depósito en rocas triásicas de los complejos Nevado-Filábride y Alpujarride del sector central de la Cordillera Bética. Bol. Geol. Y Min. T. XCIII-IV, pp. 314-329.

Martínez García, M.J. (1996). Contenido de metales pesados (plomo, cadmio, cobre, cinc) y aluminio en los suelos de Cartagena: su relación con la contaminación.. Tesis doctoral. Universidad de Murcia, 260 pp.

- Martínez, J. y Morales, A.R. (1993). Medios ambientes geológicos y su destrucción antrópica en la región de Moa. Primer taller Internacional de protección y aprovechamiento racional de los recursos naturales. Moa. Cuba. Inédita. Fondo geológico ISMM. 1-10.
- Martínez, J.M., Valero, F. y González, S., (1993). Environmental problems and proposals to reclaim the areas affected by mining exploitations in the Cartagena mountains (southeast Spain). *Landscape and Urban Plannings*, 23. 195-207. Elsevier Science Publishers B.V., Ámsterdam.
- Martínez, M., Cortez, I. y Oérez, R. (1993a). Niveles de contaminación de metales pesados Moa, Cuba. Primer taller internacional de protección y aprovechamiento racional de los recursos naturales. Moa. Cuba. Libro resumen. 47.
- Martínez, M., Cortez, I., Pérez, R., Cowley, S. y Rieumont, M. (1993b). Primer taller internacional de protección y aprovechamiento racional de los recursos naturales. Moa. Cuba. Libro resumen. 62.
- Martínez, N., Martínez, M., Cortés, I. y Maurisset, M. (1993). Metales pesados en corales escleractinios de la plataforma marina de Moa. Primer taller internacional de protección del medio ambiente y aprovechamiento racional de los recursos naturales. Moa. Cuba. Libro resumen. pp 64.
- McWhorter, D.B. and Nelson, J.D. (1979). Unsaturated Flow Beneat Tailings impounments. *Journal of the Geotechnical Engineering*, 105 (GT11), 1317-1336.
- Merian, E. (1991). Metals and their compounds in the environment. VCH Publishers, Weinheim, FRG. 1438 pp.
- Middleton, G.V. y Hampton, M.A. (1973). Sediments gravity flow: mechanics of flow and deposition. S.E.P.M. Pacific Section. Short Course.1-38
- Ministère de l'Environnement du Québec, 2.001. Politique de Protection des Soil et de Réhabilitation des Terrains Contaminés. Publications of the MEQ, Collection Terrains Contaminés, Québec.
- MJRS (Mining Journal Research Services) (1999). (<http://www.antena.nl/wise/uranium/mdap.htm/>).
- MOPTMA (Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente) (1996a). Recuperación de Usos de la Bahía de Portman. Estudio geológico e hidrogeológico de la Sierra Minera (Murcia). I.T.G.E.

- MOPTMA (Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente) (1996b). Recuperación de Usos de la Bahía de Portman. Estudio Geotécnico para el depósito de residuos de la bahía de Portman en corta minera. I.T.G.E.
- MOPTMA (Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente) (1996c). Recuperación de Usos de la Bahía de Portman. Evaluación de Impacto Ambiental del proyecto de depósito de residuos de la bahía de Portman en la corta Gloria Este. I.T.G.E.
- Montenat, C. (1973). Les formations néogènes et quaternaires du Levant Espagnol Province de Murcia). Thèse Sc. Orsay, 1170 pp.
- Morales, M.L. y Guillén, M.C. (2003). La explotación de escoriales en la sierra minera de Cartagena (Murcia entre 1840 y 1850. Una minería diferente, un caso excepcional: la explotación del escorial submarino “suerte”. Patrimonio geológico y minero y desarrollo regional. III Congreso Internacional sobre Patrimonio Geológico y Minero. Cartagena. Eds: Rábano, I., Manteca, I. y García, C. 359-366.
- Morin, K. A. and Cherry, J. A. (1988). Field investigation of a small-diameter, cylindrical contaminated groundwater plume emanating from a pyritic uranium tailing impoundment. Groundwater contamination. Field methods. Editors: Collins, A. G. y Jonson, A. I. 416-419.
- Muñoz, J.F., Rengifo, P. and Vauclin, M. (1997). Acid leaching of copper in a saturated porous material: parameter identification and experimental validation of a two-dimensional transport model. *Journal of Contaminant Hydrology*, 27, 1-24.
- Navarro, A., Collado, D. y Sánchez, J.A. (2002). Contaminación de suelos y aguas subterráneas en el área minera de sierra Almagrera (Almería). Actas do II Congresso Internacional sobre Património Geológico e Mineiro. Lisboa. 597-610.
- Norwell, W. A. 1984: Comparison of chelating agents as extractants for metals in diverse soil material. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48: 1285-1292.
- Oen, I.S., Fernández, J.C. y Manteca, J.I. (1975a). The Lead-Zinc and associated ores of La Unión, Sierra de Cartagena, Spain. *Economic Geology*. Vol. 70, pp.1259-1278.
- Oen, I.S., Windt, C.J., Winnubst, T.G.M. y Kager, P. (1975b). Epigenetic lead-zinc mineralization in Miocene pebbly mudstones, Sierra de Cartagena, Spain. *Mineralium Deposita*. V.10. 362-373.
- O.M.S. (Organización Mundial de la Salud, 1971).

- Orden de 17 de febrero de 1989, sobre protección de especies de la flora silvestre de la Región de Murcia. BORM nº 1139, publicado el 7-3-1989.
- Orden Ministerial de 18 de febrero de 1959, sobre protección de especies de la flora silvestre de la Región de Murcia. BORM nº 1139, publicado el 7-3-1989.
- Orejas, A. y Antolinos, J.A. (2001). Les mines de la Sierra de Cartagena. Atlas historique des zones minières d' Europe. Vol 19700. 1-14. Belgium.
- Ovejero, G. (1980). Volcanismo preorogénico (Trias ?) y tardiorogénico y mineralizaciones asociadas (Fe, Pb, Zn, Ag, Mn, Ba, Sn), Cartagena, Cordilleras Béticas, España : 26 th. Inst. Geol. Cong., Paris, p.982 (abs).
- Ovejero, G., Jacquin, J.P. y Servajean, G. (1976). Les mineralisations et leur contexte geologique dans la Sierra de Cartagena (Sud-Est de L'Espagne). Bull. Soc. Geol. France, tXVIII, 3, 619-633.
- Pavillon, M.J. (1969). Les minéralisations plombo-zincíferes de Carthagène (Cordilleres Bétiques, Espagne). Mineralium Deposita, v.4. 368-385.
- Pavillon, M.J. (1972). Paleogeographies, volcanismes, structures mineralisations plombo-zincíferes et heritages dans l'Est des Cordilleres Bétiques (Zones internes). Thèse Université Paris, 623 pp.
- Peñas, J.M., García, G., Faz, A. y Manteca, J.I. (2004). Pollutants transference risks from abandoned mine areas to hydric system in ephemeral hydrological processes: impact to the natural and agricultural soils. Fourth international conference on land degradation. Cartagena. p 349.
- Pérez, A. y Yuzhaninov, I. (1991). Emisiones gaseosas de la fábrica Comandante Pedro Sotto Alba y su influencia negativa sobre el medio ambiente (3ra Parte). Minería y Geología 8(1-3) 61-67.
- Pluta, I. and Trembaczowski, A. (2001). Changes of the chemical composition of discharged coal mine water in the Rontok Pond Upper Silesia, Poland. Environmental Geology, 40(4-5), 455-457.
- Pollock, D.W. (1986). Simulation of fluid flow and energy transport processes associated with high level radioactive waste disposal in unsaturated alluvion, Water Resources Research, 22(5), 765-775.

- Pulido Bosch, Antonio. (1979). "Contribución al conocimiento de la hidrogeología del prebético nor-oriental". Edita: I.T.G.E. Colección memorias.
- Queralt, I., Pujals, I., Barreiros, A. y Bordalo, M. (2002). Efectos del abandono de mina Victoria (Val d'Aran, Lleida, España) sobre el quimismo de las aguas superficiales. Actas do II Congresso Internacional sobre Património Geológico e Mineiro. Lisboa. 575-582 pp.
- Quintana, H. (1998). Diques de estériles. *Industria y Minería*, 33, 52-56.
- Ramos Escudero, A., Manteca Martínez, J.I. and García, G. (2004a). Surface soil pollution by heavy metals in "Lo Poyo" salt marshes (Cartagena-Murcia). Fouth international conference on land degradation. Cartagena. pp 342.
- Ramos Escudero, A., García, G. y Manteca Martínez, J.I. (2004b). Zinc and lead soil concentration in function of depth in a mediterranean wetland. Fouth international conference on land degradation. Cartagena. p 350.
- R.D. 2857/1978. Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera (RGNBSM). ITC 08.02.01. Depósitos de lodos procedentes de establecimientos de beneficio. B.O.E. de 9-5-2000.
- R.D. 1131/1988, de 30 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento para la ejecución del R.D.L. 1302/1986, de 28 de junio, de Evaluación de Impacto Ambiental. B.O.E. nº 239, de 5-10-1988.
- R.D. 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. B.O.E. nº 45, de 21-2-2003.
- R.D.L. 1302/1986, de 28 de junio, de Evaluación de Impacto Ambiental. B.O.E. nº 155, de 30-6-1986.
- Ribet, I., Ptacek, C.J., Blowes, D.W. and Jambor, J.L. (1995). The potential for metal release by reductive dissolution of weathered mine tailings. *Journal of Cont. Hydrology*, 17, 239-273.
- Robles-Arenas, V.M.; **García, C.**; Rodríguez, R.; Manteca, J.I. y Candela, L. (2004 a). Impacto de la minería sobre los recursos hídricos de la Sierra Minera de Cartagena-La Unión (Murcia-España). Congreso XXXIII – IAH – 7º ALHSUD GROUNDWATER FLOW UNDERSTANDING. Zacatecas City, México. Octubre 2004.

- Robles-Arenas, V.M.; **García, C.**; Candela, L. y Rodríguez, R. (2004 b). Evaluación de la calidad de las aguas subterráneas de la unidad hidrogeológica Sierra Minera (Cartagena-La Unión, Murcia, España). VIII Simposio de Hidrogeología de la AEH: Hidrogeología y Recursos Hidráulicos. Zaragoza (España). Octubre 2002. T-XXVI, 101-110.
- Robles-Arenas, V.M.; **García, C.** y Rodríguez, R. (2004 c). Evaluación de la contaminación de las aguas subterráneas tras el cierre de las actividades minero-metalúrgicas en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión (Murcia, España). III Congreso de la Naturaleza de la Región de Murcia. Sangonera la Verde-Murcia. Octubre 2004. Libro resumen, p 7.
- Rodríguez Estrella, T. (1979). Geología e hidrogeología del sector Alcaraz-Lietor-Yeste (provincia de Albacete). Síntesis geológica de la zona prebética. Edita I.T.G.E. Colección memorias. 2 tomos. 566 pp.
- Rodríguez Estrella, T. (1983). Neotectónica relacionada con las estructuras diapíricas en el Sureste de la Península Ibérica. *Tecniterrae*. Vol.5-318. 14-30. Madrid.
- Rodríguez Estrella, T. (1986). La neotectónica en la Región de Murcia y su incidencia en la ordenación del territorio. I Jorn. De Est. Del Fen. Sism. y su incidencia en la Ord. del Territ. Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. 283-303.
- Rodríguez Estrella, T. y Almoguera, J. (1986). La neotectónica al noroeste de Lorca (Murcia) y su incidencia en el canal del trasvase Tajo-Segura. I Jorn. De Est. Del Fen. Sism. y su incidencia en la Ord. del Territ. IGN, vol.7. 301-318. Madrid.
- Rodríguez Estrella, T. y Lillo Carpio, M. (1986). Los movimientos horizontales y verticales recientes y su incidencia en la geomorfología del litoral comprendido entre Sierra de las Moreras (Murcia y la de Almagrera (Almería). I Jorn. De Est. Del Fen. Sism. y su incidencia en la Ord. del Territ. Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. Publicado en el Inst. Geográf. Nac. Com. y Pon. Nº 7. 259-283.
- Rodríguez Estrella, T. y Lillo Carpio, M. (1992). Geomorfología del Mar Menor y sectores litorales contiguos (Murcia-Alicante). II Reun. Nac. de Geom.. Editado por López Bermúdez, Conesa y Romero en Estudios de Geomorfología de España. Soc. Esp. De Geomorf. Murcia. 749-787.
- Rodríguez Estrella, T. (1993). Movimiento actual de la falla de Alhama, en el corredor tectónico de Lorca-Totana, y sus consecuencias en urbanizaciones y obras públicas, V Reun. Nac. de Geol. Amb. y Ord. del Territ. Murcia. 801-810.
- Rodríguez Estrella, T. y Mancheño Jiménez, M.A. (1993). La geotectónica de Lorca y sus alrededores en relación con l actividad actual de la falla de Alhama de Murcia.

Análisis de grietas del túnel de Lorca y de los barrios altos de esta ciudad. V Reun. Nac. de Geol. Amb. y Ord. del Territ. Murcia. 709-715.

Rodríguez Estrella, T. (1995). Funcionamiento hidrogeológico del campo de Cartagena (Murcia y Alicante). Hidrogeología nº 11. 21-38. Granada.

Rodríguez Estrella, T. (1997). Estudio hidrogeológico del acuífero de Escombreras en relación con el sondeo “Cabezo de las Cuneras” situado en Alumbres del t.m. de Cartagena (Murcia). Peticionario: OCYS. Inédito.

Rodríguez Estrella, T., **García García, C.** y Manteca Martínez J.I. (1997). Estudio del medio físico en el paraje “Mina Regente” en el valle de Escombreras (El Gorguel-Cartagena).

Rodríguez Estrella, T., **García García, C.** y Manteca Martínez J.I. (1999). Estudio geológico en relación con las grietas y hundimientos aparecidos en el polígono industrial “Lo Tacón” de La Unión (Murcia). Consejería de Política Territorial y Obras Públicas de la Comunidad Autónoma de Murcia. 78 pp.

Rodríguez Estrella, T., Hernández Henrile, J.L. e Ibarguen, J. (1999). Neotectónica y tectónica activa en la depresión plio-cuaternaria del Segura (Murcia-Orihuela). 1er Cong. Nac. De Ing. Sísm. Murcia. T. 1º. 53-63.

Rodríguez Estrella, (2000). Transformaciones físicas, químicas y biológicas, por la acción de las aguas del trasvase Tajo-Segura, en la unidad hidrogeológica del Campo de Cartagena y en su vecino Mar Menor (Murcia, España). Hydrogéologie, nº 3, 23-38. Paris.

Rodríguez Estrella, T., Manteca Martínez J.I. y **García García, C.** (2000a). Estudio Hidrogeológico Campo de Golf (Atamaría-Cartagena-Murcia). Trabajo para la empresa INMOGOLF. 108 pp.

Rodríguez Estrella, T., Manteca Martínez J.I. y **García García, C.** (2000b). Informe Geológico e Hidrogeológico en la finca Potasas y Derivados, S.L. situada en el paraje El Hondón-Cartagena-Murcia). Trabajo para la empresa LQM Gestión Ambiental. 35 pp.

Rodríguez Estrella, T., Manteca Martínez J.I. y **García García, C.** (2000c). “Subsidencia minera en relación con sismotectónica, en La Unión (Murcia). V Congreso Geológico de España. Geotemas 1 (3) (2000). 149-153.

- Rodríguez Estrella, T., Manteca Martínez J.I., **García García, C.** (2001a). Contaminación de aguas subterráneas y suelos de origen industrial en el paraje El Hondón, junto a la ciudad de Cartagena (Murcia). Jornadas Técnicas Nacionales sobre investigación, gestión y recuperación de acuíferos confinados. Libro de Comunicaciones. 323-333.
- Rodríguez Estrella, T., Manteca Martínez J.I. y **García García, C.** (2001b). Informe final de los sondeos de investigación, hidrogeológicos y bombeos de ensayo en el paraje Atamaría (Cartagena-Murcia). Trabajo para la empresa INMOGOLF, S.A. 89 pp.
- Rodríguez Estrella, T., Manteca Martínez J.I., **García García, C.** (2002a). Estudio del medio físico y biótico de la finca Lo Poyo. Cartagena-Murcia. Trabajo para la empresa AMBIO, S.A. 212 pp.
- Rodríguez Estrella, T., Manteca J.I. y **García C.** (2002b). Subsistencia minera y su posible relación con una falla sismotectónica en La Unión (Murcia-España). Información Tecnológica. La Serena (Chile). Vol. 13, nº 2. pp. 53-60.
- Rodríguez, T., Manteca, J.I., **García, C.** y Queralt, I. (2003a). Aspectos geomorfológicos y estratigráficos de los pantanos de estériles mineros en la sierra de Cartagena: Un patrimonio geológico a considerar. III Congreso Internacional sobre Patrimonio Geológico y Minero. Cartagena Eds: Rábano, I., Manteca, I. y García, C. 87-96.
- Rodríguez Estrella, T., Pulido Bosch, A., **García García, C.** et al. (2003b). Ubicación de sondeos y desaladoras de agua de mar. Experiencias en la cuenca del Segura. IGME. Serie Hidrología y aguas subterráneas, nº 8. I, 701-712.
- Rodríguez, R. y Candela, L. (1998). El impacto de la actividad minera y la contaminación de las aguas subterráneas. Moa, Holguín, Cuba. La contaminación de las aguas. Un problema pendiente. (eds) Samper, J., Sahuquillo, A., Capilla, J. E. and Gómez, J., 305-311.
- Rodríguez, R.L. (2002). Estudio experimental de flujo y transporte de cromo, níquel y manganeso en residuos de la zona minera de Moa (Cuba): Influencia del comportamiento hidromecánico. *Tesis Universidad Politécnica de Cataluña*. 459 pp.
- Rodríguez, R. and Candela, L. (2004 a). Changes in groundwater chemistry due to metallurgical activities in an alluvial aquifer in the Moa area (Cuba). *Environmental Geology*, 46(1), 71-82.

- Rodríguez, R. y García, C (2004 b). Flujo y transporte de contaminantes en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión y su radio de influencia. III Congreso de la Naturaleza de la Región de Murcia. Sangonera la Verde-Murcia. Octubre 2004. Libro resumen, p 8.
- Rolandi, B. (1954). Sucinta historia de la minería cartagenera desde su mismo origen. Actos conmemorativos del centenario del cuerpo de ingenieros de minas de Madrid. 347-384.
- Ros Amorós, M.J. (1997). Estudio de paisajes para una aproximación a la ordenación ambiental de la minería a cielo abierto en la Región de Murcia. Tesis doctoral. Univ. Murcia. 494 pp.
- Ros Amorós, M.J. (1999). Guía ambiental de la minería en la Región de Murcia. Consejería de Medio Ambiente, Agricultura y Agua de la Región de Murcia. Servicio publicaciones Univ. Murcia. 249 pp.
- Rosique Ros, M J. (2000). Recopilación y análisis de los trabajos existentes sobre el Mar Menor. 152 pp.
- Sáez Paredes, D. (1996). Inventario de puntos de agua y restos arqueológicos industriales en el sector central de la sierra de Cartagena. U.P.C.T. Proyecto Fin de Carrera. Dirigido por **Cristóbal García**.
- San José Lancha, M.A. y Sánchez Fresneda, V. (1970). Estudio hidrogeológico en los alrededores de Escombreras, Cartagena (Murcia). CEBAS. 39 pp
- Sanchiz, C., García-Carrascosa, A.M. y Pastor, A. (2000). Heavy metal contents in soft-bottom marine macrophytes and sediments along the mediterranean coast of Spain. *Marine Ecology*, 21 (1) 1-16.
- Sanz de Galdeano, C., 1990. Geologic evolution of the Betic Cordilleras in Western Mediterranean. Miocene to the present. *Tectonophysics*, 172: 107-119.
- Sierra, J., Montserrat, G., Martí, E., Garau, M.A. y Cruañas, R. (1998). Estudio de los suelos afectados por el vertido de Aznalcóllar. Actas del 5º Congreso Internacional de Química. ANQUE, V-3, 237-247.
- Simonneau, J. (1973). Mar Menor: évolution sédimentologique et géochimique récente du remplissage. Thèse de l'Université de Toulouse. 172 pp.
- Smith, K.S., Ranville, J.F., Plumlee, G.S. and Macalady, D.L. (1998). Predictive double layer modeling of metal sorption in mine drainage systems. 521-547, en Jenne, E.A. (1998). Adsorption by Geomedia. Ed. Academic Press., New York, 583 pp.

- S.M.M.P.E., S.A. (Sociedad Minero Metalúrgica de Peñarroya-España, S.A.) (1970). Las explotaciones de plomo y cinc en la Sierra de Cartagena. (folleto divulgativo). 82 pp.
- S.M.M.P.E., S.A. (Sociedad Minero Metalúrgica de Peñarroya-España, S.A.) (1980). Lavadero Roberto. Monografía 1980 (documento interno). 85 pp.
- S.M.M.P.E., S.A. (Sociedad Minero Metalúrgica de Peñarroya-España, S.A.) (1985). Centro minero de la Sociedad Minera y Metalúrgica de Peñarroya-España, S.A. en Cartagena-La Unión (folleto divulgativo). 23 pp.
- Solano Oria, E (1990). Estudio minero-metalúrgico de los residuos de las explotaciones mineras de la Sierra de Cartagena. Tesis Universidad de Murcia. 203 pp.
- Solís García-Barbón, L. et al., 1988. Situación de la intrusión marina en la cuenca del Segura. **In:** TIAC, Granada España, 221-236.
- T.C.L.P. (Toxicity Characteristic Leaching Procedure), U.S. EPA Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods, SW-846.
- Tovar, J.A. (1999). Groundwater and environment on Peruvian mining. Mine Water and Environment. Editors: Fernández, R.. Volume I., Sevilla, España, 1999, 355-358.
- Troncoso, J. (1988). Evaluation of seismic behaviour of hydraulic fill structures. In Hydraulic Fill Structures. Geotechnical Special Publication_21. Eds. Van Zyl and Vick. American Society of Civil Engineers, New York, 475-491.
- Turkish Soil Pollution Control Regulations. 2000. In: Yukselen M.A. 2.002. Characterization of heavy metals contaminated soils in Horthern Cyprus. Environmental Geology 42, 597-603.
- Universidad de Murcia - Instituto del Agua (1994). Caracterización del agua de una laguna próxima a la finca Lo Poyo (Los Nietos). 51 pp.
- Urban, H. (1968). Neue Untersuchungsergebnisse zur genese der im östliche teil der erzprovinz von Cartagena (Spanien) gelegenen, Blei-Zinkerz vorkommen. Mineralium Deposita v.3, 162-170.
- Vera A. (1979). Introducción a los yacimientos de níquel cubanos, Editorial Orbe, La Habana, 213 pp.
- Vera Torres, J.A. (1994). Estratigrafía. 806 p. Ed. Rueda. Madrid.

- Victoria Jumilla, F. (1983). Contaminación y degradación del Mar Menor. Cuadernos populares 6. Série ecológica. Consejería de Cultura y Educación. Editora regional de Murcia. 26 pp.
- Vilar, J.B. y Egea Bruno, P.M. (1985). La minería murciana contemporánea (1840-1930). Caja Murcia-Universidad de Murcia. 358 pp.
- Vilar, J.B., Egea Bruno, P.M. y Fernández Gutiérrez, J.C. (1991). La minería murciana contemporánea (1930-1985). IGME. Madrid. 253 pp.
- Villanueva Martínez, M. e Iglesias López, A. Pozos y acuíferos. Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo.
- Wagner H. y Schumann E.H.R. (1991). Surface effects of total coal-seam extraction by underground mining methods. L.S. Afr. Inst. Min. Metall. Vol. 91, nº 7. 221-231.
- Wills, B.A. (1987). Tecnología de procesamiento de minerales: tratamiento de menas y recuperación de minerales. Edit. Limusa, Noriega editores. México. 568 pp.
- Wills, B.A. (1992). Mineral processing technology. Pergamon Presss, Oxford. 855 pp.
- Wittaker B.N. et Reddish D.J. (1989). Subsidence: occurrence. Prediction. Control. Editions Elsevier.
- Wolfgang Ahlf, Henner Hollert, Helga Neumann-Hensel and Mathias Ricking (2002). A guidance for the assessment and evaluation of sediment quality. J Soils & Sediments 2 (1) 37-42.
- Yasuhara, K., Hyodo, M., Hirao, K. and Horiuchi, S. (1994). Liquefaction characteristics of coal flying ash as a reclamation material. First International Congress on Environmental Geotechnics, Edmonton. Canada. 401-408.
- Yokel F.Y.; Salomone L.A. y Gray R.E. (1982). Housing construction in areas of mine subsidence. Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 108, nº GT9.
- Younger, P.L. (1999). Pronóstico del ascenso del nivel freático en minas subterráneas y sus consecuencias medio ambientales. Boletín Geológico y Minero, 110(4), 63-78.
- Younger, P.L. (2000). Nature and practical implications of heterogeneities in the geochemistry of zinc rich, alkaline mine waters and underground F-Pb mine in the UK. Applied Geochemistry, 15, 1383-1397.

<http://www.antena.nl/wise/uranium/mdap.htm/>.

<http://www.carm.es/siga>

<http://www.internatura>

<http://www.mondomarino.net>

<http://www.maestropescador.com>

<http://www.marinbi.com>

<http://www.unice.fr>

<http://www.martin.ac.uk>

<http://www.bigai.ne.jp>

<http://www.icampiflegrei.it>

<http://www.ittofauna.org>

ANEXOS

Tabla A2.1 Principales características de las estaciones meteorológicas. T = Termopluviométrica; P = Pluviométrica

REF.	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	Tipo	C o o r d e n a d a s				Altitud Z (m s.n.m.)
			Geográficas		U.T.M.		
			LONGITUD	LATITUD	X (m)	Y (m)	
E1-013	Cartagena-Puerto	T-P	00-59-13-W	37-35-52-N	677.719	4.163.162	14
E2-020	Corvera	P	01-09-26-W	37-49-50-N	662.176	4.188.684	280
E3-016	El Algar	P	00-52-02-W	37-38-50-N	688.165	4.168.883	40
E4-023	Fuente Álamo “C.H.S”	T-P	01-10-11-W	37-43-25-N	661.308	4.176.795	140
E5-025	Los Martínez del Puerto	P	01-44-49-W	37-49-04-N	668.978	4.187.402	160
E6-031	Murcia San Javier	T-P	00-48-08-W	37-47-12-N	693.537	4.184.489	2
E7-021	Murcia “San Magín”	P	01-09-17-W	37-49-32-N	662.407	4.188.133	260
E8-026	Pozo Estrecho	P	00-59-36-W	37-42-44-N	676.883	4.175.850	50
E9-019	Salinas de Cabo de Palos	T-P	00-43-20-W	37-38-15-N	701.426	4.168.115	1
E10-032	San Pedro del Pinatar	P	00-47-34-W	37-50-05-N	694.243	4.189.842	19
E11-029	Sucina	P	00-56-32-W	37-53-25-N	680.953	4.195.706	203
E12-026U	Torre Pacheco “C.CAP.A.”	P	00-57-57-W	37-44-32-N	679.235	4.179.231	50
E13-028I	Torre Pacheco “Torre Blanca”	P	00-54-15-W	37-46-40-N	684.581	4.183.297	38

Impacto y riesgo ambiental de los residuos minero-metalúrgicos de la Sierra de Cartagena-La Unión (Murcia-España)

Tabla A.2.2. Precipitaciones medias anuales (mm).

ESTACIONES METEOROLÓGICAS													
AÑO	E1-013	E2-020	E3-016	E4-023	E5-025	E6-031	E7-021	E8-026	E9-019	E10-032	E11-029	E12-026U	E13-028I
1975	338,2	422	391,3	349,5	460,8	354,5	397	361,9	280,4	302,3	303,5	426,4	320,3
1976	303,7	327	290,7	333	297,5	341,8	320	297,4	215,5	322,2	313,5	359	250,4
1977	300,7	373	435,1	331,3	367	552,1	373	322,4	272,7	395,8	376,5	332	507
1978	190,1	151,5	189,2	135,5	159,5	189,6	157	175,7	182,4	185,5	135,5	196,5	154,8
1979	205	145	394,6	149,6	140,3	191,5	154,5	181,7	184,5	173,7	222	166,5	184,2
1980	330,1	343	606,6	336,5	402,3	386,2	350,5	331,3	205,8	306,8	362	379,5	401,7
1981	112,2	129,5	269,3	155,2	91,3	125,6	134,5	162,9	115,3	166,9	221,3	215,5	172,5
1982	255,3	248	305,9	257,1	207,4	278,8	252	249,2	196,5	236,5	261,8	283,5	219,8
1983	142	178	200,1	169,5	132,7	113,5	185,5	135,3	115,4	142,5	129	158,7	70,5
1984	220,8	149	156,2	141,6	153,3	133,4	148,5	118,3	98,1	118	164,9	120,3	114,2
1985	482,2	317	597,9	261,9	273,6	322,9	301,5	289,1	342,1	227,7	293,7	408,8	336,7
1986	351,1	255,5	465	219	345,3	395,9	287	364,4	403,5	566,3	380,8	354,8	347,7
1987	190,8	281	264,4	276,6	359,7	534,1	289,5	195,5	174,8	391,9	439,5	311,7	339,6
1988	238,7	326	286,5	269,3	243,3	262,2	274,5	209,8	279,7	269,6	309,6	267,9	349,9
1989	523,7	460,5	696,7	470,2	498,4	717,3	437	552,6	500	610	563,8	514,8	521,5
1990	445,4	327,5	485,6	325,4	298,6	425,7	304	345,9	508,1	255,4	348,7	353,8	365,7
1991	432	342,5	543,6	312,9	359,1	432	339	386,8	338,4	333,8	390,1	337,6	368,8
1992	373,1	300	362,9	306,7	314,4	308,1	343	294,9	314,8	284,8	292	461,8	299
1993	436,5	253	623,5	317,2	291,8	389,3	275,5	458,4	406,6	337,3	332,1	408,9	444,9
1994	227,9	100,8	316,2	208,1	206,5	260,9	179	248,6	222,3	243,6	191,8	236,9	229,3
1995	118,2	98	124,7	117,3	59,7	100,8	98,5	80,5	216,7	59,6	126	75,3	74,2
1996	253,1	281,5	315,1	261,7	281,8	293,2	269	268,7	246,7	406,7	327,5	280,9	248,5
1997	322,8	440	314,1	377,6	369,2	268,8	437,5	309	304,4	247	347,6	323,4	238,1
1998	260,4	191,5	224,3	145,3	192,7	255,4	205,5	219	181,6	340,2	244,7	255	158,5
n	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
X	293,92	268,37	369,15	259,5	271,09	318,07	271,37	277,47	261,51	288,80	301,99	294,44	277,3
σ_{n-1}	113,77	106,39	157,98	91,83	114,86	149,03	96,26	113,04	110,97	128,27	110,25	104,26	125,35
σ_n	111,38	104,15	154,53	89,90	112,44	145,89	94,24	110,66	108,63	125,57	107,93	102,06	122,71

Tabla A2.3. Precipitaciones medias mensuales. Periodo 1975-1998.

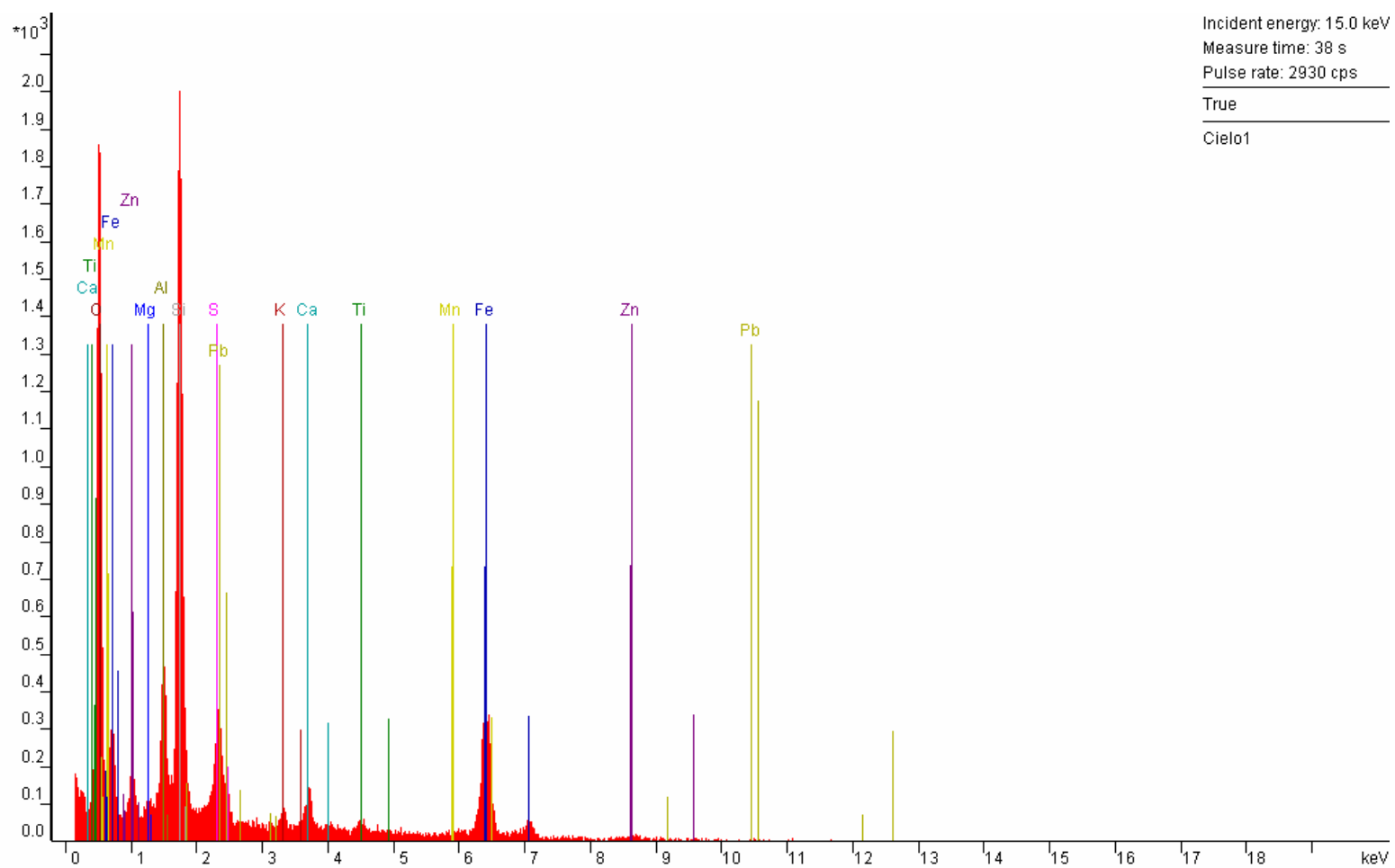
MES	ESTACIONES								ESTACION DEL AÑO	
	E1	E3	E4	E8	E12	E13	E6	VALOR MEDIO	LLUVIA	%
	013	016	023	026	026U	028I	031	MENSUAL		
Oct	33,31	47,78	28,01	30,88	32,83	38,40	36,62	35,40		
Nov	30,68	40,71	24,75	25,12	28,97	28,80	41,01	31,43	90,66	30,43
Dic	26,70	25,29	18,86	22,45	24,82	19,43	29,23	23,83		
Ene	38,78	48,13	26,53	33,98	32,99	31,53	38,99	35,85		
Feb	35,47	41,52	31,41	29,31	32,72	31,38	29,19	33,00	92,98	31,21
Mar	28,68	32,90	20,72	23,00	20,78	18,17	24,66	24,13		
Abr	2,96	29,09	29,29	26,02	29,37	25,79	26,05	27,94		
May	28,99	39,32	30,70	31,83	34,15	33,25	34,78	33,29	70,77	23,74
Jun	7,25	10,35	10,48	9,70	10,01	9,49	9,51	9,54		
Jul	2,93	4,59	3,55	3,67	4,52	5,78	6,64	4,53		
Ago	5,68	9,30	8,46	6,76	9,20	10,78	6,48	8,09	43,55	14,62
Sep	25,49	40,18	26,74	30,58	34,08	24,52	34,91	30,93		
TOTAL	293,92	369,16	259,50	273,30	294,44	277,32	318,07	297,96	297,96	100,00

Tabla A2-4. Temperaturas medias anuales. Periodo 1975-1998.

AÑO	ESTACIONES METEOROLÓGICAS						
	E1-013	E3-016	E4-023	E6-031	E8-026	E12-026U	E13-028I
1975	17,6	17,6	18,2	16,3	17,7	16,1	16,4
1976	17,6	17,7	18,4	16,3	17,4	16,5	16,9
1977	17,9	18,1	18,5	16,6	17,9	16,7	17,0
1978	18,1	18,2	18,8	17,0	18,1	13,5	17,2
1979	18,2	18,4	19,2	16,9	18,3	17,5	17,5
1980	17,8	17,8	18,5	16,7	17,8	17,2	17,2
1981	18,3	18,5	18,8	17,3	18,4	17,6	17,6
1982	18,3	18,5	18,7	17,5	18,3	17,8	17,7
1983	18,2	18,5	18,8	17,4	18,4	17,8	17,7
1984	17,8	17,8	18,2	16,8	17,8	16,7	17,0
1985	18,4	18,7	19,1	17,2	18,5	17,2	17,5
1986	18,4	18,7	19,1	17,1	18,2	17,3	17,5
1987	18,8	18,9	19,4	17,6	18,4	16,4	18,0
1988	18,7	19,0	19,6	17,6	18,6	17,3	18,0
1989	19,2	19,1	19,5	18,0	18,7	17,8	18,1
1990	18,7	18,6	19,0	17,8	18,5	17,3	17,8
1991	18,0	16,8	18,4	16,9	17,2	16,7	17,1
1992	18,0	17,4	18,5	16,9	16,8	16,8	17,1
1993	17,6	17,8	18,1	16,6	16,2	16,9	17,0
1994	18,8	19,0	18,8	17,8	18,1	18,2	18,2
1995	18,9	18,2	18,1	17,9	19,0	18,3	18,5
1996	18,5	17,6	17,2	17,4	18,5	17,6	17,9
1997	18,6	18,4	17,9	18,1	19,2	18,5	18,2
1998	18,6	18,5	17,9	18,0	19,0	18,1	17,9

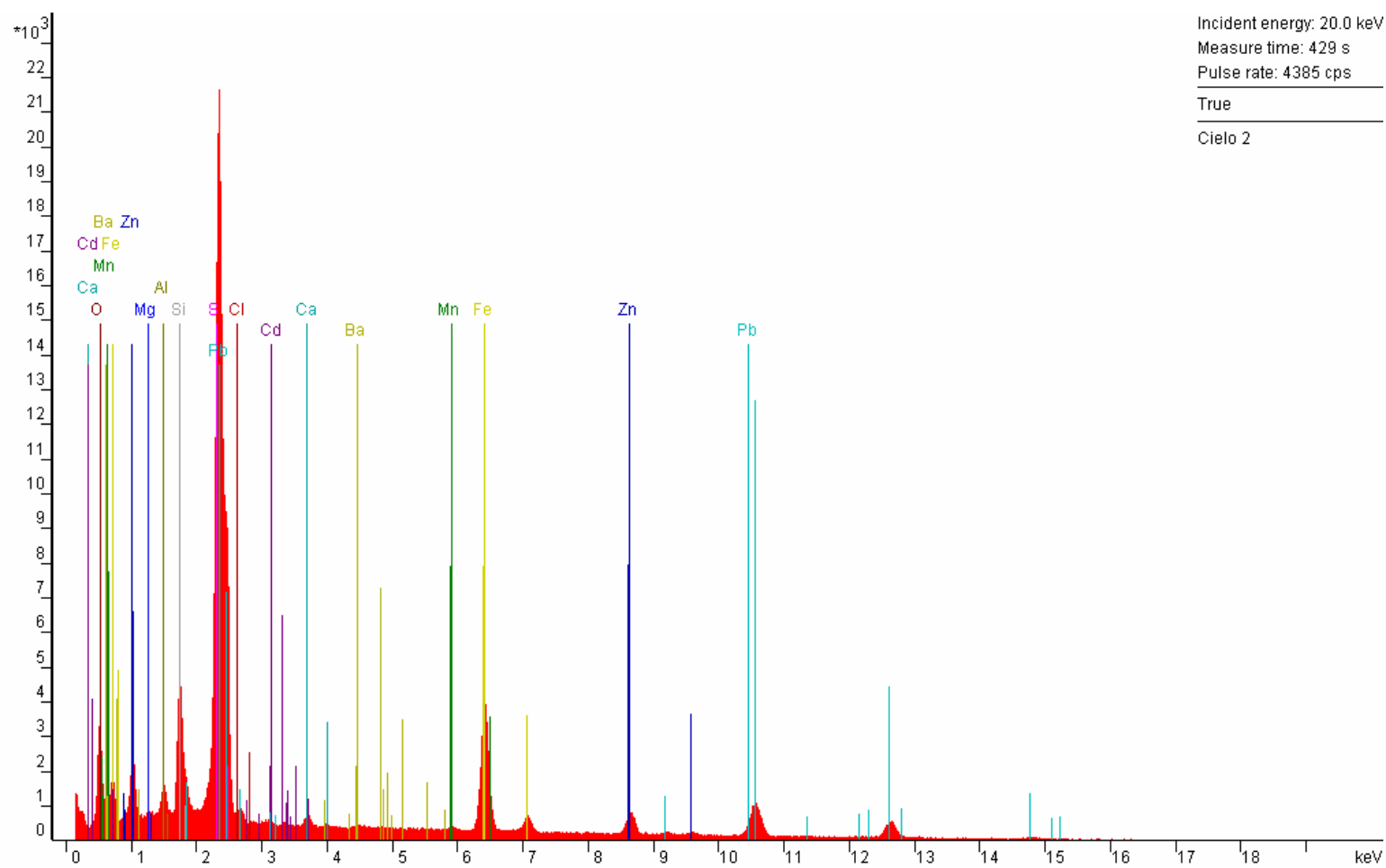
Tabla A2.5. Temperaturas medias mensuales. Periodo 1975-1998.

MES	ESTACIONES							Valor medio
	E1 013	E3 016	E4 023	E8 026	E12 026U	E13 028I	E6 031	
Oct	19,62	19,63	19,55	19,37	16,87	19,08	18,76	18,98
Nov	15,95	15,63	15,10	15,17	13,10	15,04	14,84	14,98
Dic	13,20	12,94	11,99	12,22	10,93	12,06	11,93	12,18
Ene	11,84	11,86	11,03	11,12	10,94	10,86	10,77	11,20
Feb	12,73	12,73	12,49	12,27	12,20	11,86	11,70	12,28
Mar	14,17	14,30	14,59	13,98	13,95	13,43	13,11	13,93
Abr	15,84	15,85	16,50	15,90	16,24	14,96	14,75	15,72
May	18,57	18,65	19,59	19,12	19,24	17,98	17,59	18,68
Jun	22,40	22,47	23,85	22,82	22,98	21,87	21,41	22,54
Jul	25,22	25,40	26,97	25,82	25,17	24,65	24,13	25,34
Ago	26,08	26,02	27,39	26,18	23,63	25,44	24,95	25,67
Sep	23,73	23,44	24,32	23,59	20,63	23,17	22,81	23,10
TOTAL	18,28	18,24	18,61	18,13	17,16	17,53	17,23	17,88



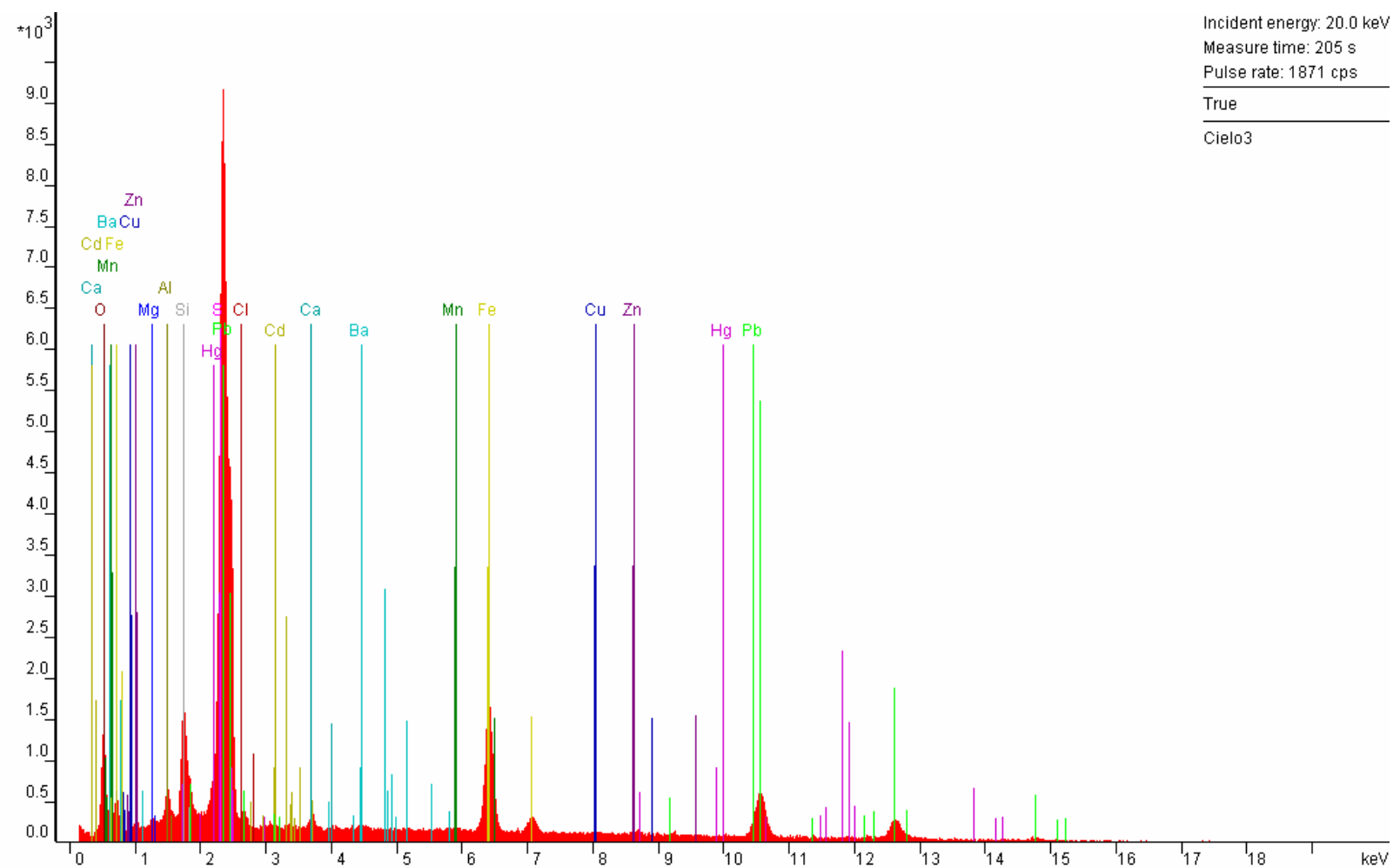


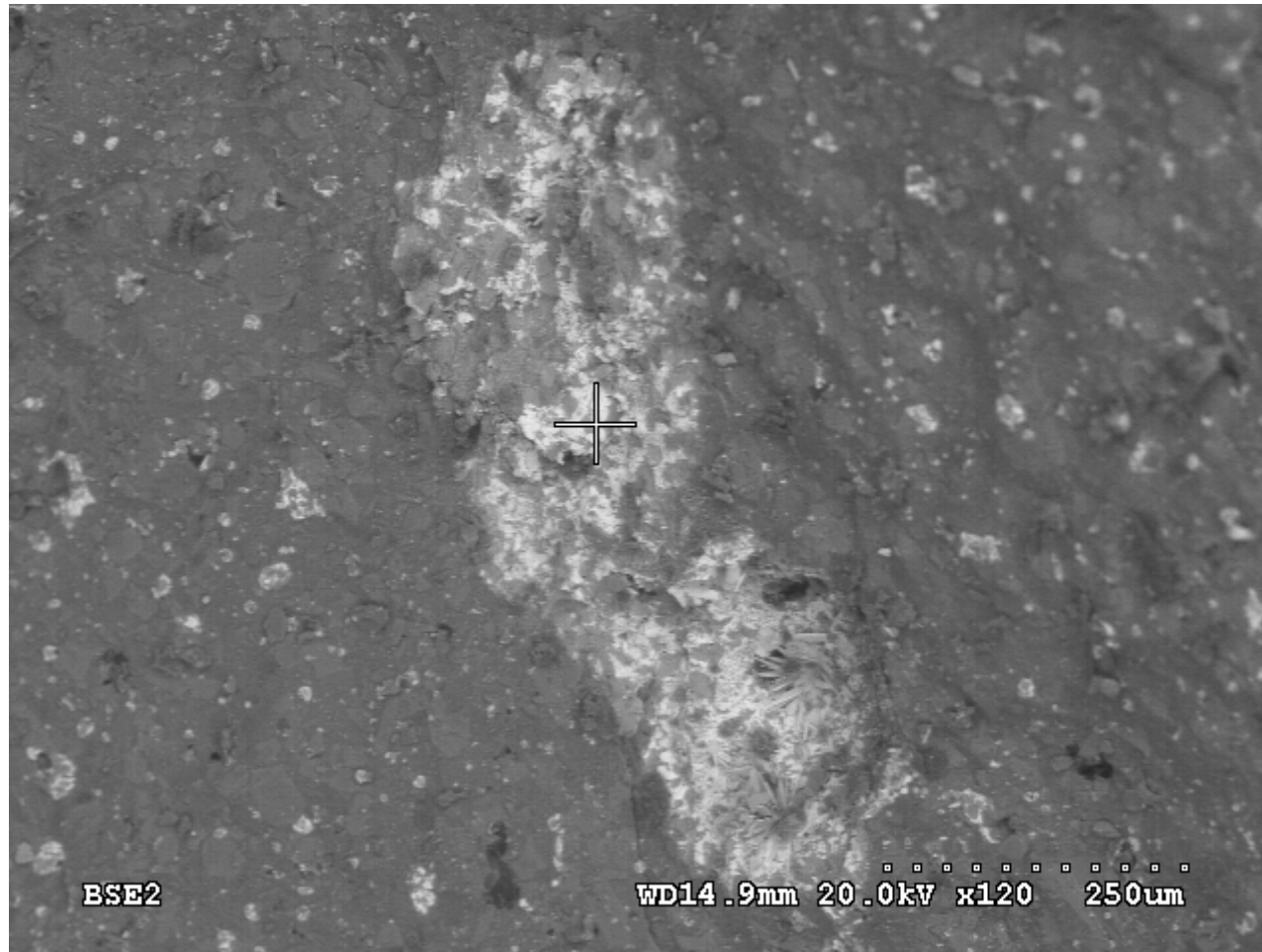
Gachero - Cielo 1



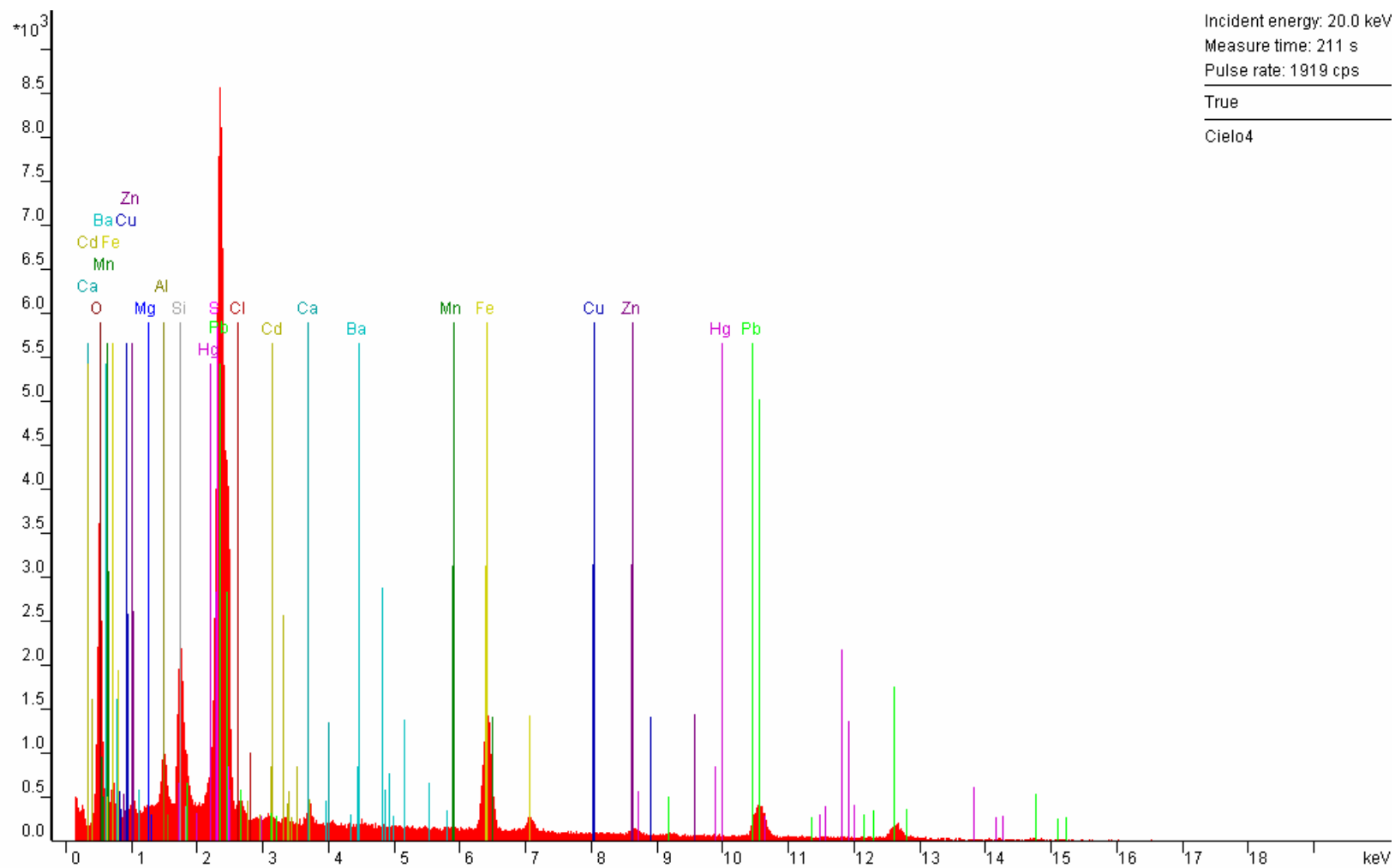


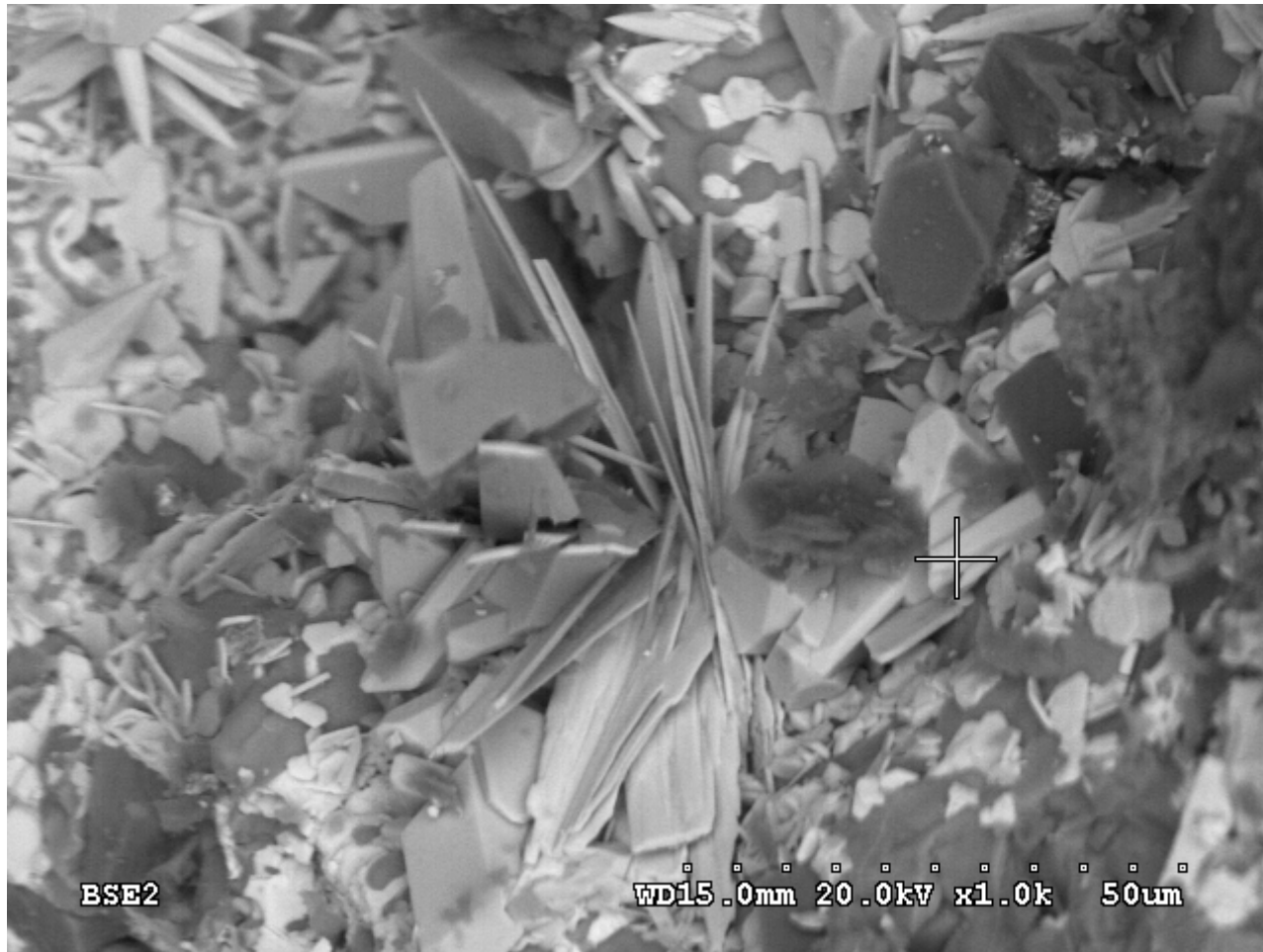
Gachero - Cielo 2



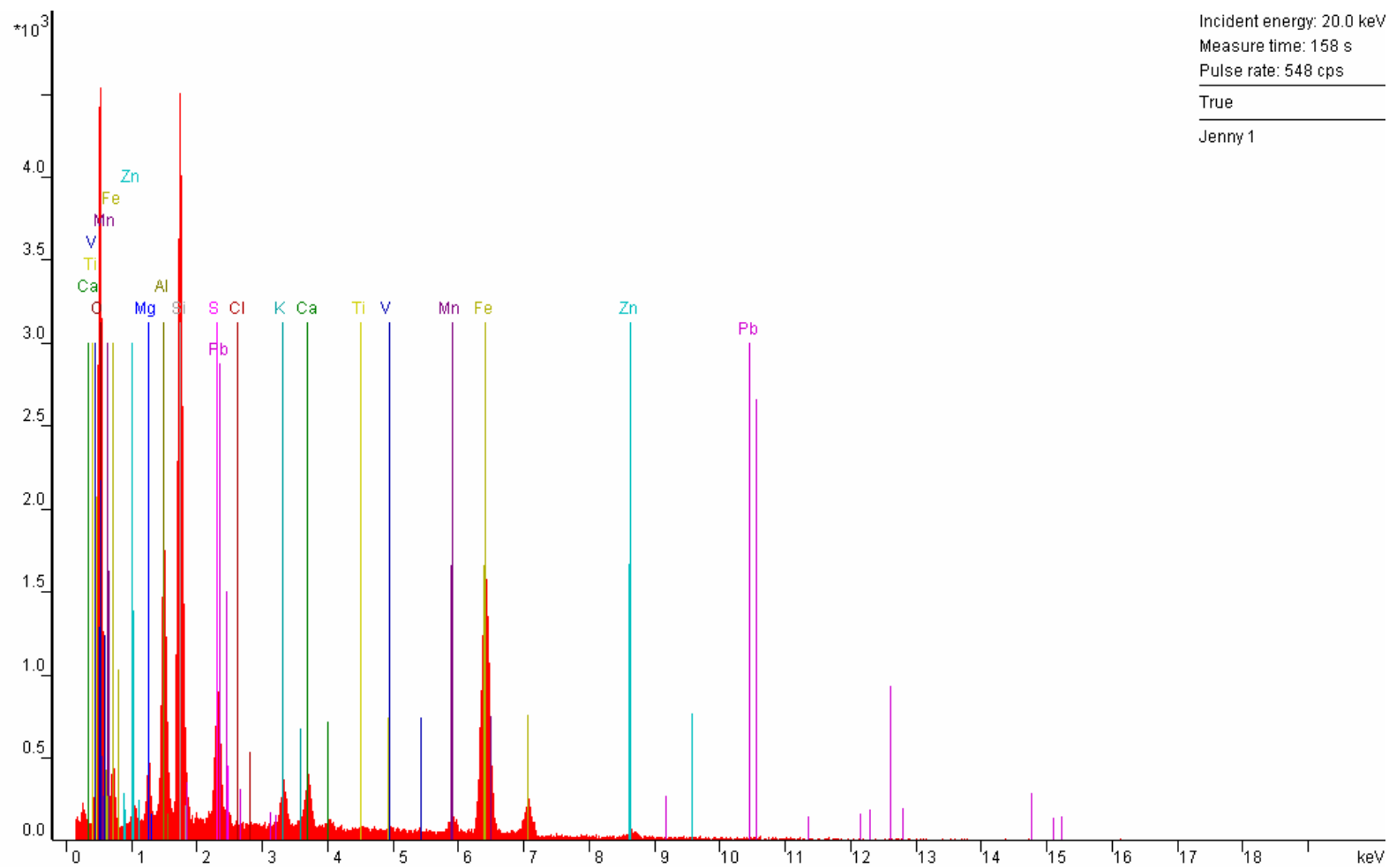


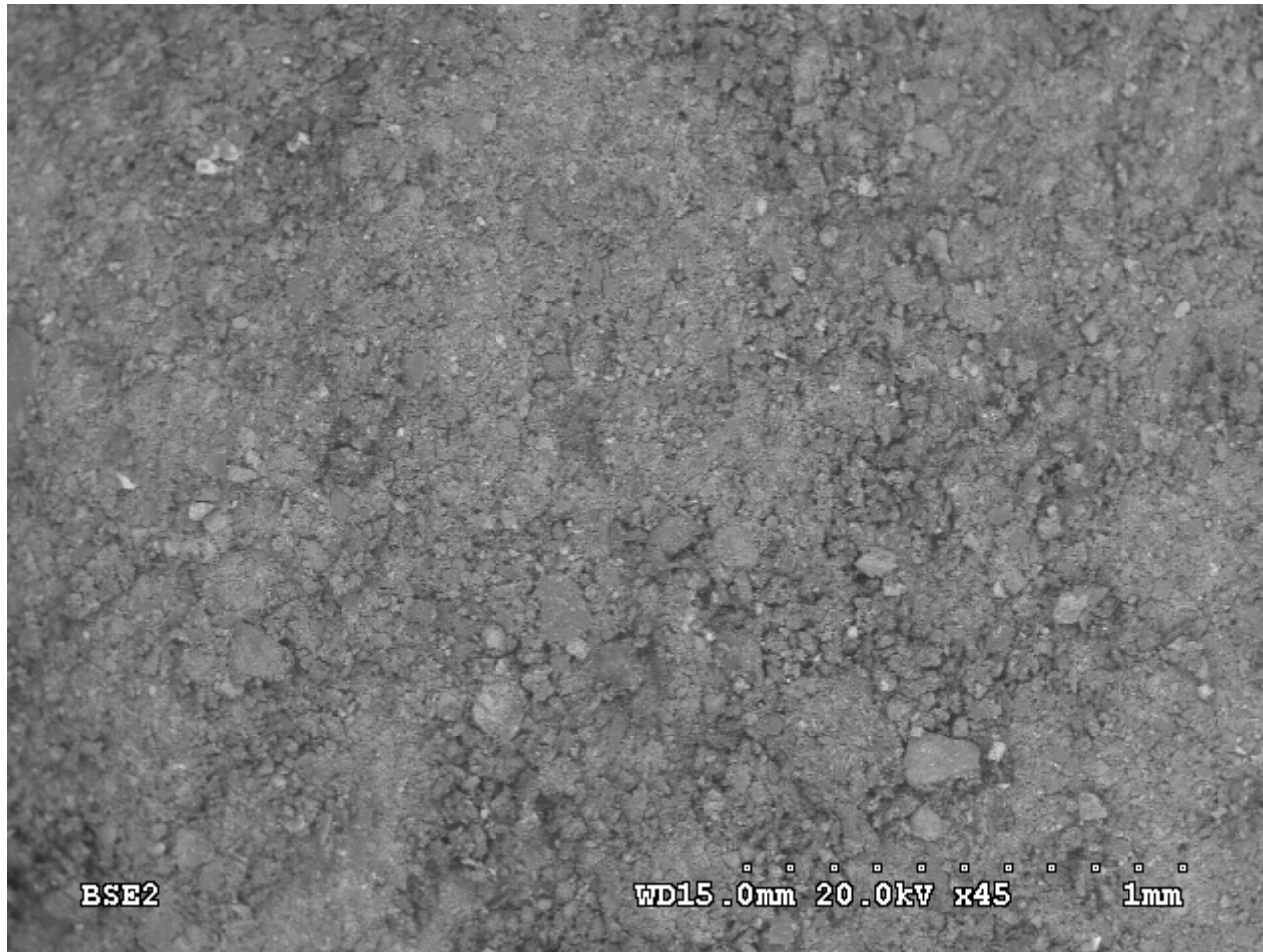
Gachero - Cielo 3



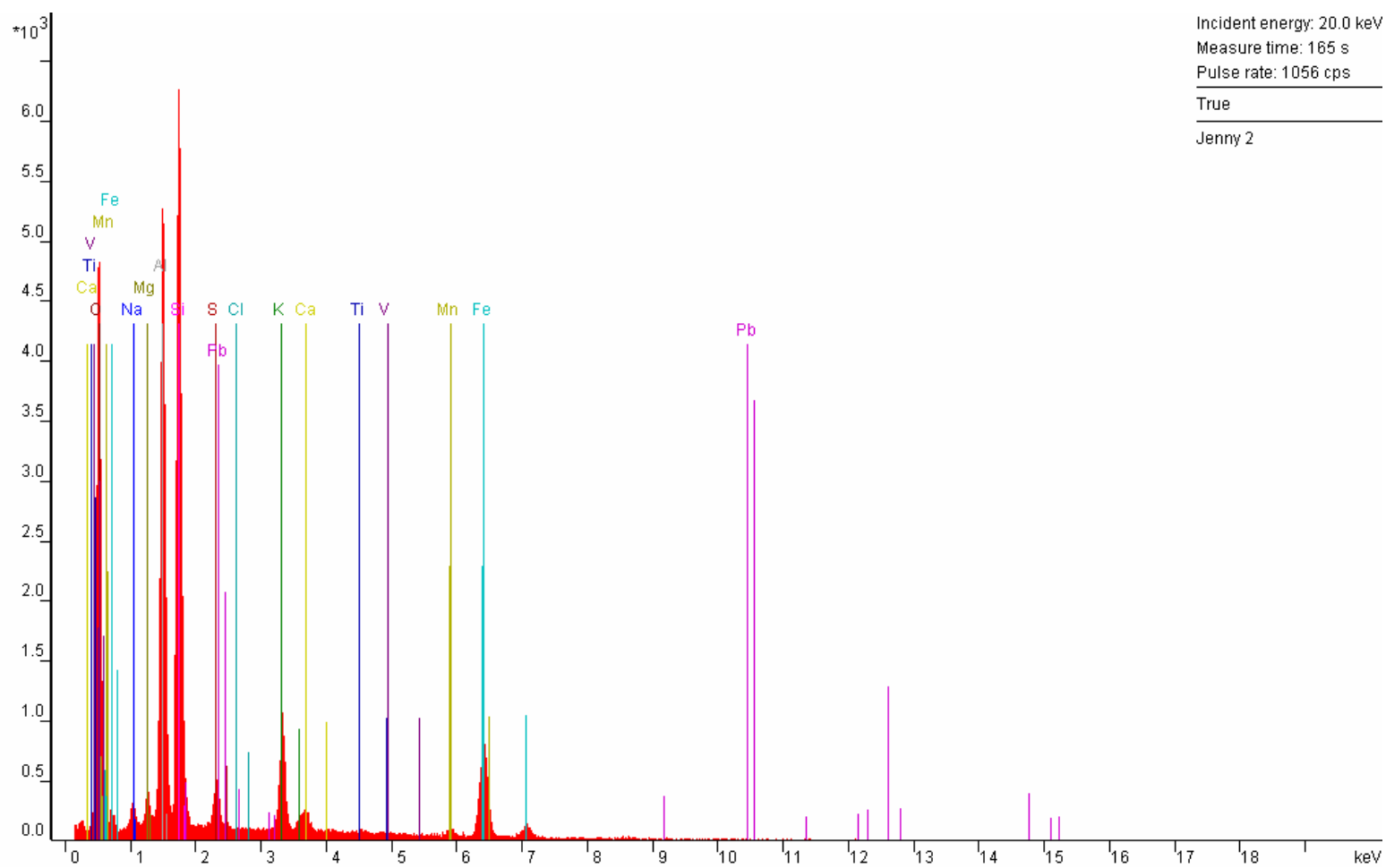


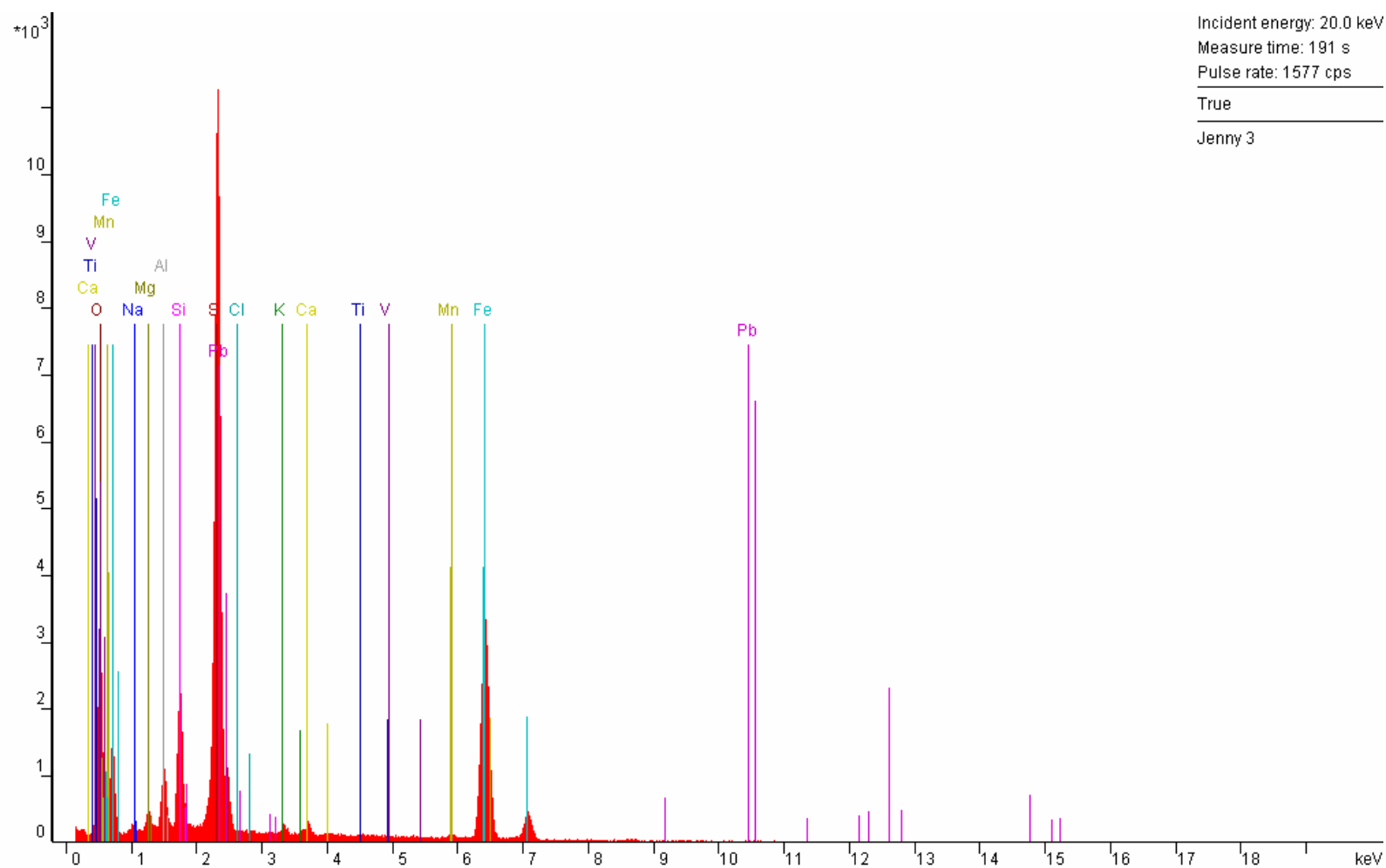
Gachero - Cielo 4

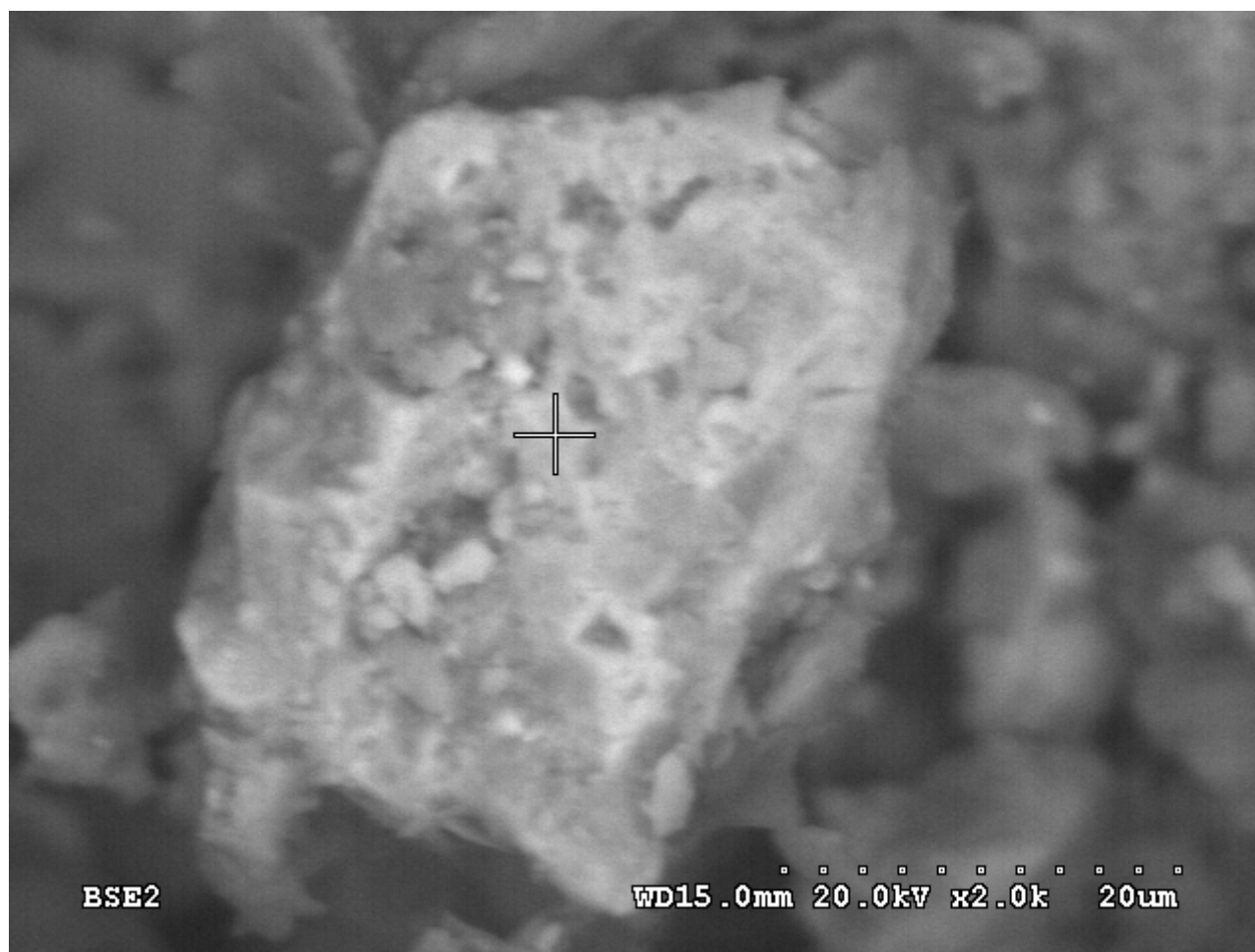




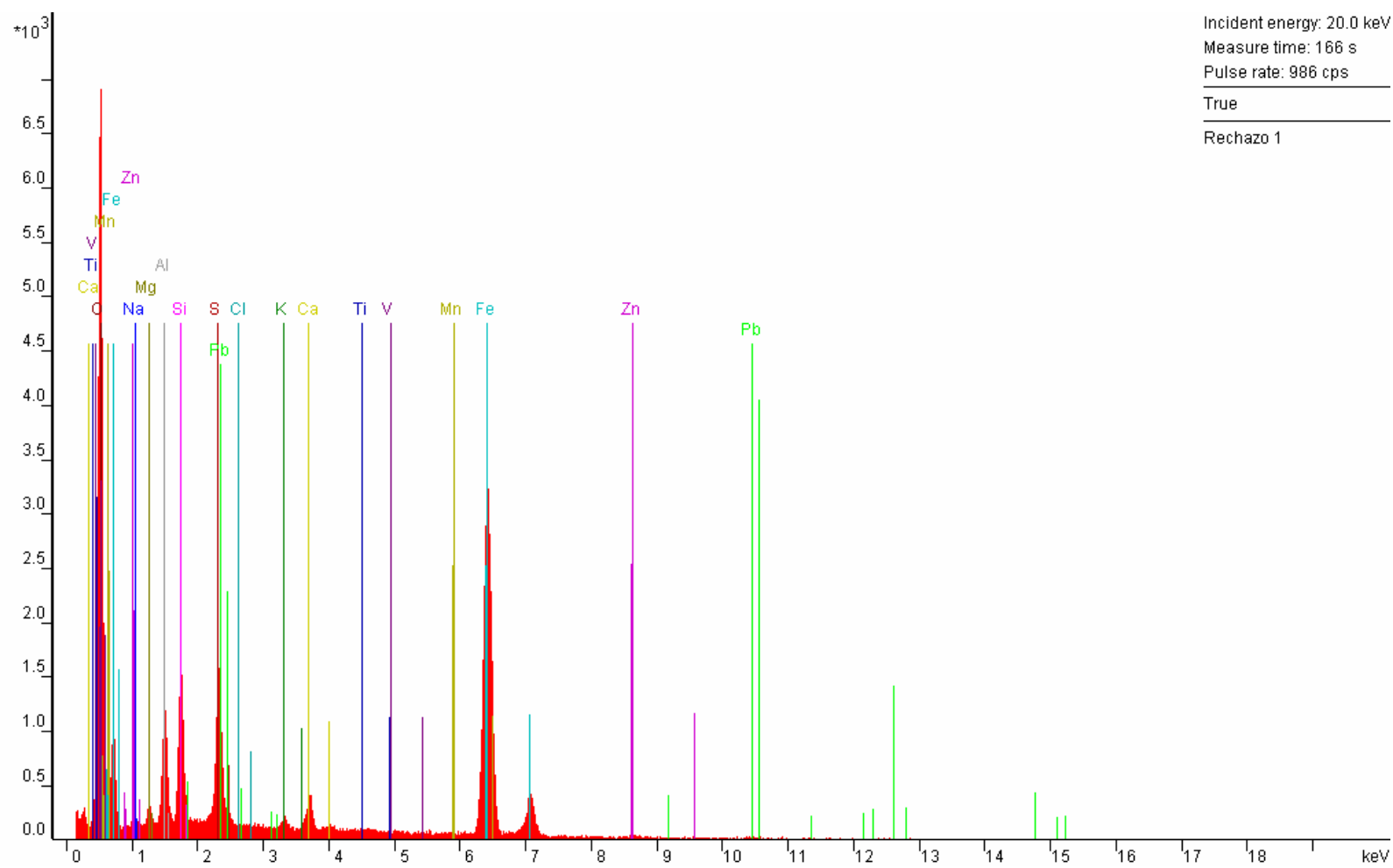
Lodos de flotación - Jenny 1





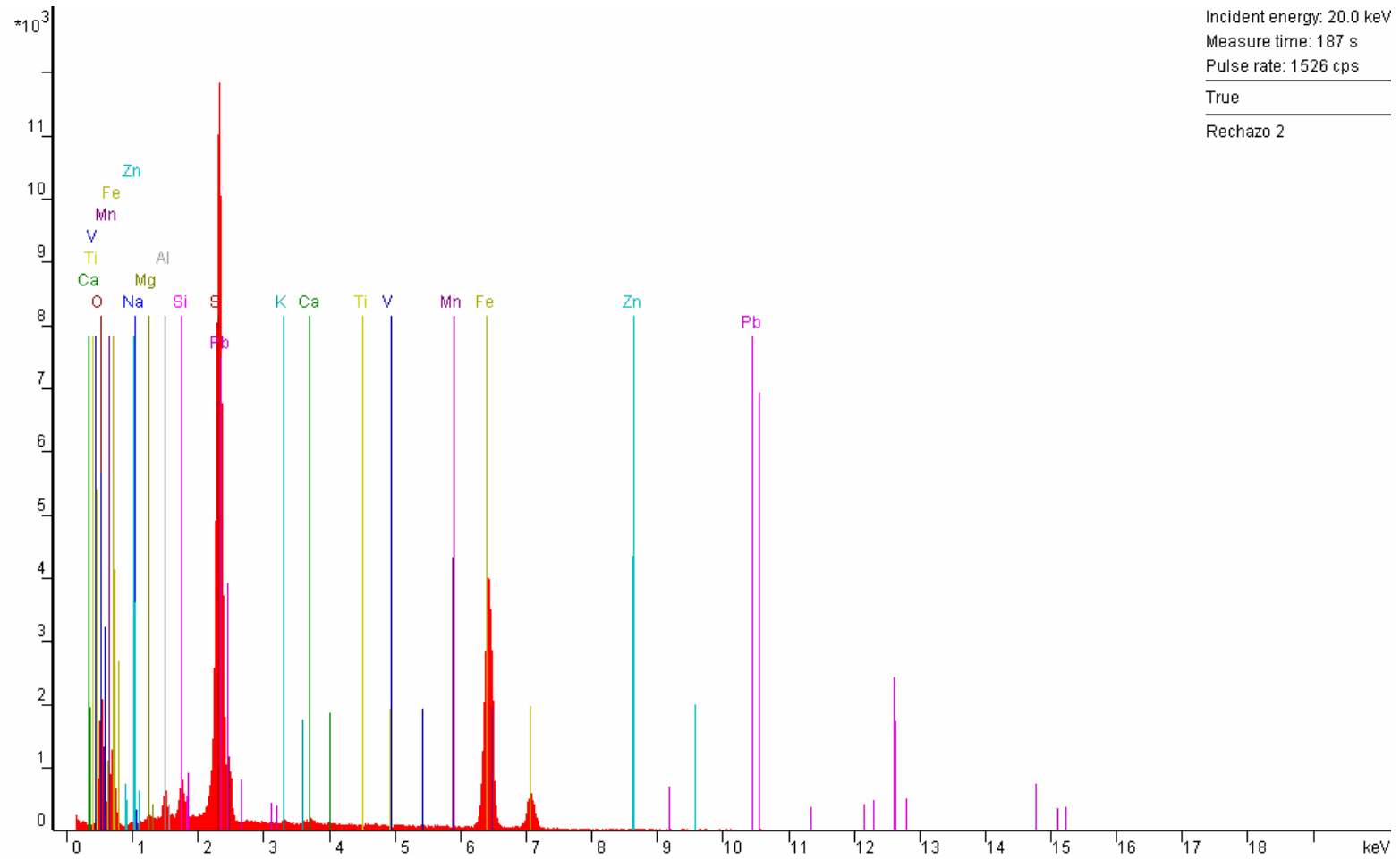


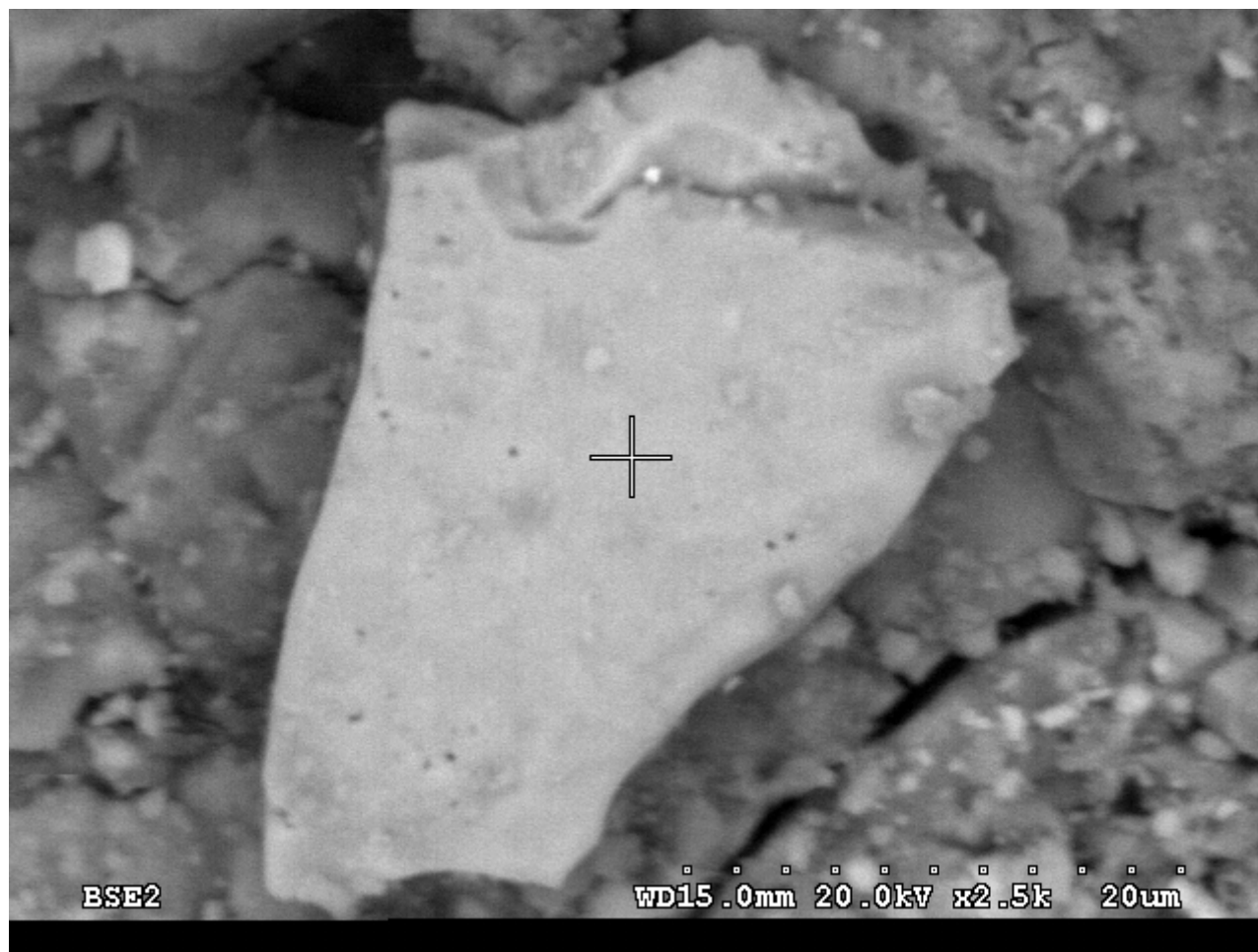
Jenny 3



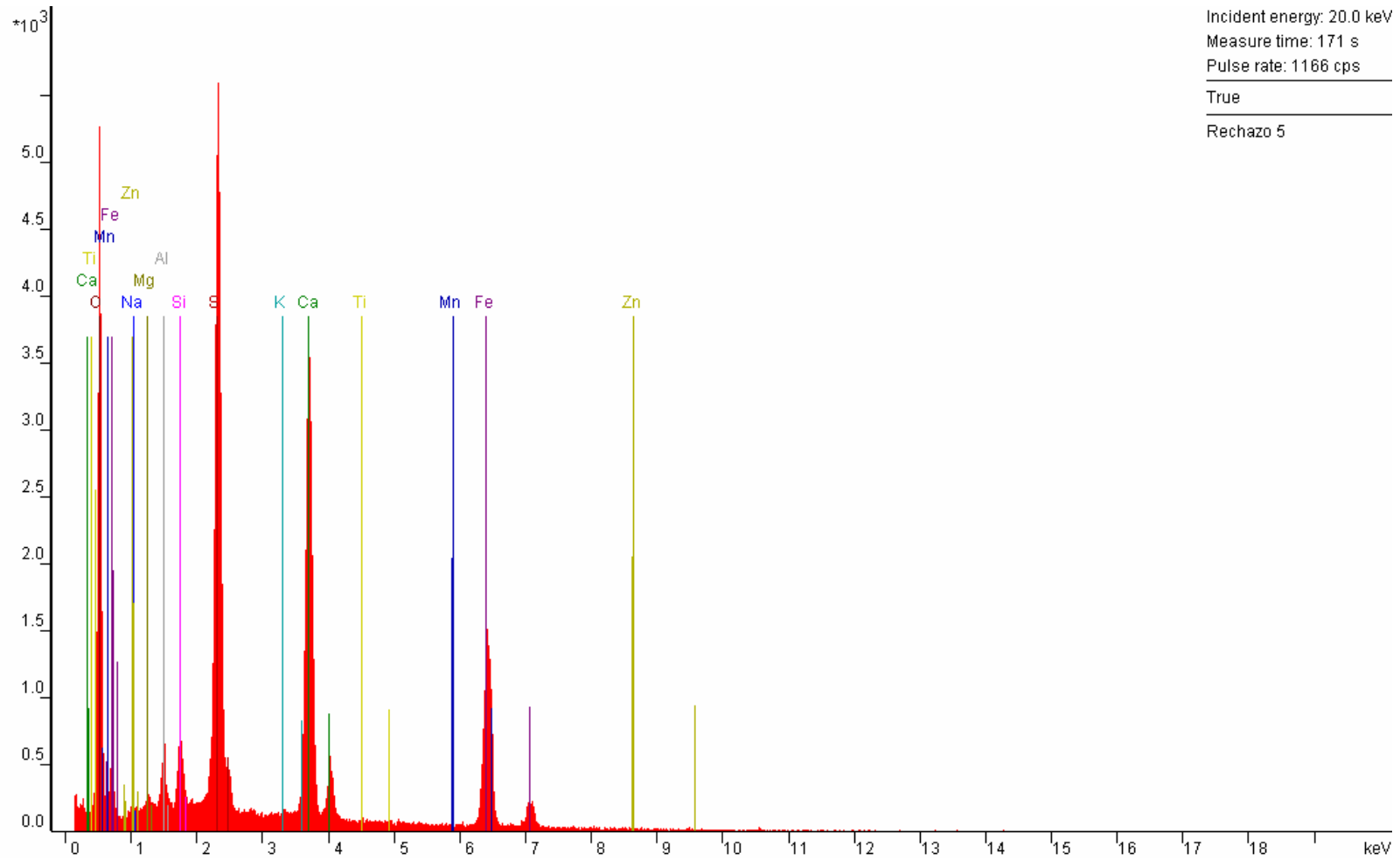


Rechazo de granulometría 1





Rechazo de granulometría 2







FICHA INVENTARIO DE POZOS MINEROS

FECHA DEL INVENTARIO:

ELABORADA POR: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA – ÁREA DE GEODINÁMICA EXTERNA

NÚMERO DEL POZO	HOJA M.T.N. 1:50.000	Fracción 1:25.000	Fracción 1:5.000	Nº ORDEN en la hoja 1:5.000	OTROS NÚMEROS
	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	

CONCESIÓN MINERA:

NÚMERO DE LA CONCESIÓN:

TOPONÍMIA:

COORDENADAS U.T.M.				COTA
X		Y		Z (m.s.n.m.)
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

TERMINO MUNICIPAL	
16	CARTAGENA
42	LA UNIÓN
24	LORCA

PROTECCIÓN DEL POZO

- 0 No tiene protección
 1 Brocal bloques
 2 Brocal ladrillo
 3 Brocal mampostería
 4 Brocal piedra
 5 Brocal mixto bloques-piedra
 6 Brocal mixto bloques-mampostería
 7 Alambrada
 8 Tape hormigón
 9 Emparrillado de redondos y/o vigas de acero
 10 Alambre de espino
 11 Otros

TIPO DE SECCIÓN DE LA PROTECCIÓN DEL POZO

- 1 Circular
 2 Rectangular
 3 Cuadrada
 4 Elíptica
 5 Poligonal
 6 Irregular

DIMENSIÓN DE LA SECCIÓN DE LA PROTECCIÓN (sección del brocal en m):

Circular , Demás formas , × ,

ALTURA DE LA PROTECCIÓN (altura del brocal): , m

REVESTIMIENTO DEL POZO

- 1 Sin revestir
 2 Ladrillo
 3 Piedra
 4 Mampostería
 5 Otros

Figura A4.1.a. Ficha para toma de datos en campo.

PROFUNDIDAD DEL POZO

1 0-10 m 2 10-30 m 3 > 30 m

TIPO DE SECCIÓN DEL POZO

1 Circular 2 Rectangular 3 Cuadrada 4 Elíptica 5 Poligonal 6 Irregular

DIMENSIÓN DE LA SECCIÓN DEL POZO (diámetro del pozo en m):

Circular , Demás formas , × ,

CIMENTACIÓN: 1 SUELO 2 ROCA

PELIGROSIDAD	
1	ALTA (no existe protección)
2	MEDIA (altura mínima, < 0,90 m)
3	BAJA ($\geq 0,90$ m, tape hormigón, emparrillado, etc.)

ACCESIBILIDAD	
1	FACIL (senda con automóvil)
2	POCO (senda sin automóvil)
3	INACCESIBLE (no existe senda)

VISITABILIDAD	
1	FRECUENTE (lugar de interés)
2	POCO FRECUENTE (sin interés, buen acceso)
3	EXCEPCIONAL (sin interés, difícil acceso)

PROXIMIDAD A POBLACIÓN	
1	LEJANO (> 1000 m)
2	PRÓXIMO (1000-500 m)
3	CERCANO (< 500 m)

RESTOS ARQUEOINDUSTRIALES	
1	NO
2	SI

EXISTENCIA DE AGUA	
1	NO
2	SI

USO DEL AGUA	
1	NO
2	SI

NIVEL PIEZOMÉTRICO:

REFERENCIAS PRÓXIMAS:

MATERIALES DE LA TERRERA:

OTRAS OBSERVACIONES:

FECHA FOTOGRAFÍA DIGITAL:

DIRECCIÓN FOTO: N

NOMBRE FOTOGRAFÍA: C - . jpg

Figura A4.1.b. Ficha para toma de datos en campo.

ELEMENTO PATRIMONIAL MINERO		
Nº	Nombre	TM
CH-3003	CHIMENEA DE MÁQUINA DE VAPOR EN MINA SAN FRANCISCO JAVIER	Cartagena
CH-3004	CHIMENEA DE MÁQUINA DE VAPOR EN MINA OPORTUNIDAD	Cartagena
CH-3018	CHIMENEA DE MAQUINA DE VAPOR DE LA PARRETA	Cartagena
CH-3021	POLVORIN Y CHIMENEA DE POLVORIN EN LA PARRETA.	Cartagena
CH-3025	CHIMENEA DE MAQUINA DE VAPOR EN MINA MONSERRAT	La Unión
CH-3027	CHIMENEA DE MAQUINA DE VAPOR EN MINA LA PALMERA	La Unión
CH-3030	CHIMENEA DE MAQUINA DE VAPOR EN LA MINA TRINIDAD	La Unión
CH-3033	CHIMENEA EN LA MINA LA OCASIÓN 2	La Unión
CH-3042	CHIMENEA DE MAQUINA DE VAPOR EN LA MINA LO VEREMOS NUEVO	La Unión
CH-3045	CHIMENEA DE FUNDICION EN LA MINA DESAMPARADOS	La Unión
CH-3046	CHIMENEA DE FUNDICION EN MANCOMUNIDAD MINA 2º GLOBO	La Unión
CH-3047	CHIMENEA DE FUNDICION ROMA	La Unión
CH-3055	CHIMENEA DE MAQUINA DE VAPOR EN MINA TELEMACO	Cartagena
CH-3056	CHIMENEA DE MAQUINA DE VAPOR EN MINA SAN JUAN BAUTISTA	Cartagena
CH-3085	CHIMENEA DE FUNDICIÓN EN FUNDICIÓN ORCELITANA	La Unión
CH-3086	CHIMENEA DE FUNDICION EN CONCESION BRANDI	La Unión
CH-3090	CHIMENEA DE FUNDICION EN CONCESION SIVET	La Unión
G-1009	MINA AGRUPA VICENTA.	La Unión
G-1010	MINA PABLO Y VIRGINIA	Cartagena
H-3002	HORNO DE CALCINACION EN MINA DE SAN FRANCISCO JAVIER	Cartagena
H-3007	HORNO DE CALCINACION EN MINA INOCENTE	Cartagena
H-3016	HORNO DE CALCINACIÓN EN MINA PRONTA	La Unión
H-3050	2 HORNOS DE CALCINACIÓN EN MINA SAN JORGE	La Unión
H-3054	HORNO DE CALCINACIÓN EN MINA TELEMACO	Cartagena
H-3058	HORNO DE CALCINACIÓN EN MINA SANTA FILOMENA	Cartagena
H-3059	HORNO DE CALCINACION EN MINA VENTURA	Cartagena
H-3075	HORNO DE CALCINACIÓN EN MINA SAN RAFAEL	Cartagena
H-3084	3 HORNOS DE CALCINACIÓN EN MINA PRESENTACION LEGAL	La Unión

H-3089	HORNO DE CALCINACION EN MINA AMISTAD	La Unión
H-3091	HORNO DE CALCINACION EN MINA FELIZ ANUNCIO	La Unión
H-3093	2 HORNOS DE CALCINACION EN CONCESION SIVET	La Unión
H-3142	HORNO DE CALCINACIÓN EN MINA DEMASÍA /REMUNERADA	La Unión
H-3155	HORNO DE CALCINACIÓN EN MINA DEMASIA A SAN ISIDORO	Cartagena
K-3000	CASTILLETE DE AMANPOSTERÍA EN MINA SAN BARTOLOME	Cartagena
K-3001	CASTILLETE DE MADERA EN MINA SAN FRANCISCO JAVIER	Cartagena
K-3005	CASTILLETE METÁLICO EN MINA DIOS TE AMPARE	Cartagena
K-3006	CASTILLETE METÁLICO EN MINA LABERINTO	Cartagena
K-3012	CASTILLETE DE MADERA EN MINA A SANTELVAS	Cartagena
K-3017	CASTILLETE DE MAMPOSTERIA EN SANCTI SPIRITU	La Unión
K-3019	CASTILLETE DE MADERA EN LA MINA SAN SIMÓN	Cartagena
K-3020	CASTILLETE DE MADERA EN LA MINA MANOLITA.	Cartagena
K-3024	CASTILLETE METALICO EN MINA MONSERRAT	La Unión
K-3026	CASTILLETE DE MADERA EN MINA SAN ISIDORO	La Unión
K-3028	CASTILLETE DE MADERA EN MINA DON CARLOS	Cartagena
K-3029	CASTILLETE METALICO EN MINA TRINIDAD	La Unión
K-3031	CASTILLETE DE MADERA EN LA MINA LA OCASIÓN 1	La Unión
K-3032	CASTILLETE DE MADERA EN LA MINA LA OCASIÓN 2	La Unión
K-3034	CASTILLETE DE MADERA EN LA MINA SAN LORENZO	La Unión
K-3035	CASTILLETE DE MADERA EN MINA REVOLUCIÓN	La Unión
K-3036	CASTILLETE DE MADERA EN LA MINA EN EL TRANVIA	La Unión
K-3037	CASTILLETE DE MADERA EN LA MINA LA ARTESIANA	La Unión
K-3038	CASTILLETE DE MAMPOSTERIA EN LA MINA LA ARTESIANA	La Unión
K-3039	CASTILLETE DE MADERA EN LA MINA MARIA JESUS.	La Unión
K-3040	CASTILLETE METALICO EN LA MINA LA CIERVA	La Unión
K-3041	CASTILLETE DE MADERA EN LA MINA LO VEREMOS NUEVO	La Unión
K-3043	CASTILLETE DE MADERA EN LA MINA LO VEREMOS VIEJO	La Unión
K-3044	CASTILLETE DE MADERA EN LA MINA LOS BURROS	La Unión
K-3048	CASTILLETE DE MAMPOSTERIA EN MINA POZO CUEVAS	La Unión

K-3049	CASTILLETE DE MAMPOSTERIA EN MINA SAN JORGE	La Unión
K-3051	CASTILLETE DE MAMPOSTERIA EN MINA SAN SEBASTIAN	Cartagena
K-3052	CASTILLETE DE MADERA EN MINA POZO EL CIELO	Cartagena
K-3061	CASTILLETE DE MADERA EN MINA SEGUNDA PAZ	Cartagena
K-3062	CASTILLETE DE MADERA EN MINA PRIMERA PAZ	Cartagena
K-3063	CASTILLETE DE MAMPOSTERIA EN MINA SAN FERNANDO	Cartagena
K-3064	CASTILLETE DE MADERA EN MINA JULIO CESAR	Cartagena
K-3065	CASTILLETE DE MAMPOSTERIA EN MINA BRIGIDA	Cartagena
K-3066	CASTILLETE DE MAMPOSTERIA EN LA MINA SANTA EDUVIGIS	Cartagena
K-3067	CASTILLETE DE MAMPOSTERIA EN MINA MENDIGORRIA	Cartagena
K-3068	CASTILLETE DE MAMPOSTERIA EN MINA MENTOR	Cartagena
K-3070	CASTILLETE DE MADERA EN MINA CATON	Cartagena
K-3071	CASTILLETE METALICO EN MINA LA PAGANA	Cartagena
K-3072	CASTILLETE DE MAMPOSTERÍA EN MINA MONTE CARMELO	Cartagena
K-3073	CASTILLETE DE MAMPOSTERIA EN MINA EL LIRIO	Cartagena
K-3074	CASTILLETE DE MAMPOSTERIA EN MINA JOSEFITA	Cartagena
K-3076	CASTILLETE MAMPOSTERIA EN MINA TERESITA	Cartagena
K-3077	CASTILLETE MAMPOSTERIA EN MINA SECRETARIA	Cartagena
K-3080	CASTILLETE DE MADERA EN MINA SANTO TOMÁS	Cartagena
K-3081	CASTILLETE DE MAMPOSTERÍA EN MINA CANDELARIA	Cartagena
K-3082	CASTILLETE DE MADERA EN MINA MAS ALECTA	La Unión
K-3083	CASTILLETE DE MAMPOSTERIA EN MINA SAN DIONISIO	La Unión
K-3088	CASTILLETE DE MAMPOSTERIA EN MINA SEGUNDO FERROCARRIL	La Unión
K-3092	CASTILLETE DE MAMPOSTERIA EN MINA SAN JERONIMO	La Unión
K-3126	CASTILLETE DE MADERA EN MINA SANTA ANTONIENTA	Cartagena
K-3133	CASTILLETE DE MAMPOSTERIA EN MINA FELIPE Y SANTIAGO	Cartagena
K-3135	CASTILLETE DE MAMPOSTERIA EN MINA WASHINGTON	Cartagena
K-3145	CASTILLETE METALICO EN MINA ASDRÚBAL	La Unión
K-3148	CASTILLETE DE MAMPOSTERIA EN MINA DEMASÍA A INOCENTE	Cartagena
L-3124	LAVADERO ROBERTO	La Unión

L-3144	LAVADERO EL LÍRIO	Cartagena
L-3147	LAVADERO EN RAMBLA DEL AVENQUE	La Unión
L-3150	LAVADERO EN MINA SAN LORENZO	La Unión
MT-3094	MAQUINARIA DE TRACCION DEL CASTILLETE EN MINA MANOLITA	Cartagena
MT-3095	MAQUINARIA DE TRACCION DEL CASTILLETE EN MINA MONSERRAT	La Unión
MT-3096	MAQUINARIA DE TRACCION DEL CASTILLETE EN MINA SAN ISIDORO	La Unión
MT-3097	MAQUINARIA DE TRACCION DEL CASTILLETE EN MINA DON CARLOS	Cartagena
MT-3098	MAQUINARIA DE TRACCION DEL CASTILLETE EN MINA TRINIDAD	La Unión
MT-3099	MAQUINARIA DE TRACCION DEL CASTILLETE EN MINA LA OCASIÓN 1	La Unión
MT-3100	MAQUINARIA DE TRACCION DEL CASTILLETE EN MINA LA OCASIÓN 2	La Unión
MT-3101	MAQUINARIA DE TRACCION DEL CASTILLETE EN MINA SAN LORENZO	La Unión
MT-3102	MAQUINARIA DE TRACCION DEL CASTILLETE EN MINA REVOLUCION	La Unión
MT-3103	MAQUINARIA DE TRACCION DEL CASTILLETE EN MINA EN EL TRANVIA	La Unión
MT-3104	MAQUINARIA DE TRACCION DEL CASTILLETE EN MINA ARTESIANA	La Unión
MT-3105	MAQUINARIA DE TRACCION DEL CASTILLETE EN MINA MARIA JESUS	La Unión
MT-3106	MAQUINARIA DE TRACCION DEL CASTILLETE EN MINA LA CIERVA	La Unión
MT-3107	MAQUINARIA DE TRACCION DEL CASTILLETE EN MINA LO VEREMOS NUEVO	La Unión
MT-3108	MAQUINARIA DE TRACCION DEL CASTILLETE EN MINA LO VEREMOS VIEJO	La Unión
MT-3109	MAQUINARIA DE TRACCION DEL CASTILLETE EN MINA LOS BURROS	La Unión
MT-3110	MAQUINARIA DE TRACCION DEL CASTILLETE EN MINA POZO EL CIELO	Cartagena
MT-3113	MAQUINARIA DE TRACCION DEL CASTILLETE EN MINA CATON	Cartagena
MT-3114	MAQUINARIA DE TRACCION DEL CASTILLETE EN MINA LA PAGANA/2ª RESUCITADA	Cartagena
MT-3115	MAQUINARIA DE TRACCION DEL CASTILLETE EN MINA JOSEFITA	Cartagena
MT-3116	MAQUINARIA DE TRACCION DEL CASTILLETE EN MINA SECRETARIA	Cartagena
MT-3117	MAQUINARIA DE TRACCION DEL CASTILLETE EN MINA SANTO TOMAS	Cartagena
MT-3118	MAQUINARIA DE TRACCION DEL CASTILLETE EN MINA SANTA ANTONIETA	Cartagena
MT-3119	MAQUINARIA DE TRACCION DEL CASTILLETE EN MINA DIOS TE AMPARE	Cartagena
P-3013	POLVORIN EN MINA A SANTELVAS	Cartagena
P-3022	POLVORIN DE LA PARRETA	Cartagena
P-3079	POLVORIN EN MINA LOBA	Cartagena

T-3023	TÚNEL DE LA PARRETA	Cartagena
T-3125	TUNEL JOSÉ MAESTRE	Cartagena/La
T-3136	TUNEL LILIAN	La Unión
T-3137	TUNEL DEL PRINCIPE	La Unión
T-3139	TUNEL BUENA SUERTE	Cartagena
T-3140	TUNEL EN MINA PRECAUCIÓN	Cartagena
T-3141	TUNEL EN MINA JULIO CESAR	Cartagena
CH-3014	CHIMENEA DE FUNDICIÓN CAMARON	Cartagena
CH-3151	CHIMENEA DE AGUILONES	Cartagena
CH-3152	CHIMENEA EN LO CAMPANO	Cartagena
G-1017	CORTA LOS BLANCOS II	Cartagena
H-3009	HORNO EN FUNDICION SANTA ISABEL	Cartagena
H-3069	HORNO DE CALCINACIÓN EN MINADOS LA POBRECITA	Cartagena
H-3143	3 HORNOS DE CALCINACIÓN EN MINA SAN PABLO	Cartagena
H-3146	HORNO DE CALCINACIÓN DE FUNDICIÓN CAMARÓN	Cartagena
H-3149	HORNO DE CALCINACIÓN DE LAS COLMENAS	Cartagena
H-3154	HORNO DE CALCINACIÓN EN MINA CUARENTA	Cartagena
K-3008	CASTILLETE DE MADERA EN MINA DOS AMIGOS	Cartagena
K-3010	CASTILLETE DE MADERA EN MINA SAN RAFAEL	Cartagena
K-3015	CASTILLETE DE MAMPOSTERIA EN MINA PRONTA	Cartagena
K-3053	CASTILLETE METALICO EN MINA SANTA MATILDE	La Unión
K-3057	CASTILLETE METALICO EN MINA SAN QUINTIN	Cartagena
K-3127	CASTILLETE DE MADERA EN MINA CONSUELO	Cartagena
K-3128	CASTILLETE DE MAMPOSTERIA EN MINA SAN BENITO	Cartagena
K-3129	CASTILLETE DE MAMPOSTERIA EN MINA HAITÍ	La Unión
K-3130	CASTILLETE DE MAMPOSTERIA EN MINA JOAQUINA	Cartagena
K-3131	CASTILLETE DE MADERA EN MINA PALOMA	Cartagena
K-3132	CASTILLETE DE MAMPOSTERIA EN MINA DEMASIA	La Unión
K-3134	CASTILLETE DE MAMPOSTERIA EN MINA PRECAVIDO	La Unión
K-3153	CASTILLETE METALICO DE S. M. M. PEÑARROYA ESPAÑA S.A.	Cartagena

MT-3111	MAQUINARIA DE TRACCION DEL CASTILLETE EN MINA SANTA MATILDE	La Unión
MT-3112	MAQUINARIA DE TRACCION DEL CASTILLETE EN MINA SAN QUINTIN	Cartagena
MT-3120	MAQUINARIA DE TRACCION DEL CASTILLETE EN MINA DOS AMIGOS	Cartagena
MT-3121	MAQUINARIA DE TRACCIÓN DEL CASTILLETE EN MINA CONCILIO / CONSUELO	Cartagena
MT-3122	MAQUINARIA DE TRACCION DEL CASTILLETE EN MINA SAN RAFAEL	Cartagena
MT-3123	MAQUINARIA DE TRACCION DEL CASTILLETE EN MINA EL SANTO	Cartagena
T-3138	TUNEL LOS PAJARILLOS	Cartagena

ELEMENTO PATRIMONIAL GEOLÓGICO		
N°	Nombre	TM
G-1001	CABEZO DE LA VIUDA	Cartagena
G-1003	CABEZO DEL FRAILE	Cartagena
G-1005	CABEZO RAJAO	Cartagena/La Unión
G-1006	AFLORAMIENTO OXIDADO DEL MANTO DE SILICATOS EN LA CARRETERA DEL 33.	La Unión
G-1007	MINA REMUNERADA	La Unión
G-1008	DIQUE BRECHA	La Unión
G-1011	CUELLO VOLCÁNICO DEL COLLADO DE LAS LAJAS.	La Unión
G-1012	GOSSAN DE LA CRISOLEJA	La Unión
G-1013	DOMO SUBVOLCÁNICO DE 2º CARBONATO	La Unión
G-1020	VENTANA TECTÓNICA DEL COLLADO DE ATAMARÍA.	Cartagena
G-1023	MINA LABERINTO	Cartagena
G-1028	ACANTILADOS DE CALA DEL CABALLO, MINA LA GAVIOTA Y PLAYA DE REDIDUOS MINEROS.	Cartagena/La Unión
G-1031	CALBLANQUE	Cartagena
G-1032	TÚNEL JOSÉ MAESTRE	La Unión
G-1002	VENTANA TECTÓNICA DE LA CALA DEL CABALLO	Cartagena
G-1004	CORTA BRUNITA	Cartagena
G-1014	SURGENCIA DE LA RAMBLA DE LA CRISOLEJA.	La Unión

G-1015	ACANTILADOS DE PUNTA DE LA GALERA	La Unión
G-1016	CUEVA VICTORIA	Cartagena
G-1018	CORTA SULTANA O LOS BLANCOS III	Cartagena
G-1019	CABEZO DE LA FUENTE	Cartagena
G-1021	CANTERA EMILIA	Cartagena/La Unión
G-1022	BALSA DE ESTÉRILES DE LA ROSA	Cartagena
G-1025	CANTILADOS Y ZONA COSTERA DE LA CHAPA (PORTMÁN)	Cartagena/La Unión
G-1026	RUTA DE CENIZAS	Cartagena
G-1027	CALA REONA	Cartagena
G-1029	CORTA SAN VALENTÍN	Cartagena/La Unión
G-1030	CABEZO SAN GINÉS DE LA JARA	Cartagena

ELEMENTO PATRIMONIAL ARQUEOLÓGICO		
Nº	Nombre	TM
Y-2001	CALBLANQUE I	Cartagena
Y-2002	CUEVA DE LOS PÁJAROS	Cartagena
Y-2003	CUEVA DE LOS MEJILLONES	Cartagena
Y-2004	ABRIGO DE LOS DENTALES	Cartagena
Y-2005	LAS AMOLADERAS	Cartagena
Y-2006	EL CASTILLET	Cartagena
Y-2007	PLAYA DE EL CASTILICO	Cartagena
Y-2008	NECRÓPOLIS IBÉRICA DE LOS NIETOS	Cartagena
Y-2009	LAS MATEAS	Cartagena
Y-2010	LOMA DEL ESCORIAL	Cartagena
Y-2011	LO POYO I	Cartagena
Y-2012	LOS NIETOS VIEJOS I (Monte Roca)	Cartagena
Y-2013	SIMA DEL MANANTIAL	Cartagena

Y-2014	EL MONTILLO	Cartagena
Y-2015	CASAS DE LA RIBERA	Cartagena
Y-2016	EL CORRALÓN	Cartagena
Y-2017	LO POYO II	Cartagena
Y-2018	LO POYO III	Cartagena
Y-2019	LO POYO IV	Cartagena
Y-2020	LAS TRIOLAS	Cartagena
Y-2021	CALA REONA	Cartagena
Y-2022	CABO DE PALOS	Cartagena
Y-2023	LA LOMA (MAR DE CRISTAL)	Cartagena
Y-2024	MAR DE CRISTAL	Cartagena
Y-2025	LOS HUNCOS	Cartagena
Y-2026	FUENTE VIEJA	Cartagena
Y-2027	LO CAPOTE	Cartagena
Y-2028	LOS NIETOS VIEJOS II	Cartagena
Y-2029	EL RANGO	Cartagena
Y-2030	CALBLANQUE II	Cartagena
Y-2031	VILLA PELEGRÍN	Cartagena
Y-2032	CABEZO AGUDO	Cartagena
Y-2033	CABEZO RAJAO	Cartagena
Y-2034	MONTE MIRAL	Cartagena
Y-2035	SAN GINÉS DE LA JARA	Cartagena
Y-2036	CUEVA VICTORIA	Cartagena
Y-2037	VILLA DEL PATURRO	Cartagena
Y-2038	CALZADA DE PORTMAN	Cartagena
Y-2039	INSTALACIONES ROMANAS DEL GORGUEL	Cartagena
Y-2040	VILLA DE LOS RUICES	Cartagena
Y-2041	CABEZO DE LA ATALAYA	Cartagena
Y-2042	CABEZO DE SAN JOAQUÍN	Cartagena
Y-2043	MINA Balsa	Cartagena/La Unión

Impacto y riesgo ambiental de los residuos minero-metalúrgicos de la Sierra de Cartagena-La Unión (Murcia-España)

Y-2044	ATAMARÍA	Cartagena
Y-2045	LOS CAPURUCHOS	Cartagena
Y-2046	PLAYA DEL GORGUEL	Cartagena
Y-2047	BARRANCO DEL MORO	Cartagena
Y-2048	LAS CENIZAS	Cartagena
Y-2049	TIRO DE PICHON	Cartagena
Y-2050	EL PUNTAL	Cartagena
Y-2051	PLAYA EL ARENAL	Cartagena
Y-2052	LOS URRUTIAS	Cartagena
Y-2053	LA HUERTECICA	Cartagena
Y-2054	EL ABREVADERO	Cartagena
Y-2055	CABEZO VENTURA I	Cartagena
Y-2056	CABEZO VENTURA II	Cartagena
Y-2057	SAN DAMASO	La Unión
Y-2058	MONTE SAN CRISTOBAL	La Unión
Y-2059	SEGUNDA DIANA	La Unión
Y-2060	ESTRELLA	La Unión
Y-2061	MERCURIO	La Unión
Y-2062	SANCTI SPIRITU-LOMO DE LOS LOBOS	La Unión
Y-2063	HUERTO DE SANTA CATALINA	La Unión
Y-2064	LA PALOMA	La Unión
Y-2065	LA GALERA	La Unión
Y-2066	SAN JOSE	La Unión
Y-2067	JULIA	La Unión
Y-2068	MINA DIFICULTAD	La Unión
Y-2069	CANTERA DE LAS COLMENAS	Cartagena
Y-2070	LA PURA	La Unión
Y-2071	NEPTUNO	Cartagena
Y-2072	MINA SAN RAMON	La Unión
Y-2073	DESAMPARADOS	La Unión

Y-2074	TORREBLANCA	La Unión
Y-2075	EL GACHERO	La Unión
Y-2076	LA PAZ	Cartagena
Y-2077	CABEZO OTAHONERO	La Unión
Y-2078	SAN FERNANDO	Cartagena
Y-2079	EUGENIA	La Unión
Y-2080	TOCATARPA	Cartagena
Y-2081	FUNDICION ROMA	La Unión
Y-2082	FELIZ ANUNCIO	La Unión
Y-2083	DEPOSITARIA	La Unión
Y-2084	BRAGELONE	La Unión
Y-2085	MINA COLMENERA	Cartagena
Y-2086	FUENTE DEL SAPO	Cartagena
Y-2087	COLA DEL CABALLO	La Unión
Y-2088	LOS GALLAROS	La Unión
Y-2090	LAS CLARAS / EI GARBANZAL	La Unión
Y-2091	POBLADO Y NECRÓPOLIS DE ESCOMBRERAS	Cartagena
Y-2092	LA APARECIDA	Cartagena
Y-2093	ESCUCHA	Cartagena
Y-2094	CABEZO MARCELINO	Cartagena
Y-2095	CABEZO DE LA VIUDA	Cartagena
Y-2096	CABEZO BEAZA	Cartagena
Y-2097	FINCA LA TORRE	Cartagena
Y-2098	CABEZO GALLUFO	Cartagena
Y-2099	BARRANCO DEL FEO	Cartagena