

UNIVERSIDAD DE MURCIA
Departamento de Química Agrícola, Geología y
Edafología



**EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN POR VÍA
HIDRICA DE ELEMENTOS TRAZA EN ÁREAS CON
INFLUENCIA DE ACTIVIDADES MINERO-
METALÚRGICAS. APLICACIÓN A LA SIERRA
MINERA DE CARTAGENA-LA UNIÓN (MURCIA)**

Mari Luz García Lorenzo
2009

Memoria presentada por D^a Mari Luz García Lorenzo para aspirar al título de Doctor con Mención Europea.

Murcia, a 23 de julio de 2009

Fdo. Mari Luz García Lorenzo



D^a **CARMEN PÉREZ SIRVENT**, Profesora Titular de Universidad del Área de Cristalografía y Mineralogía en el Departamento de Química Agrícola, Geología y Edafología, AUTORIZA:

La presentación de la Tesis Doctoral titulada "**Evaluación de la contaminación por vía hídrica de elementos traza en áreas con influencia de actividades minero-metalúrgicas. Aplicación a la Sierra Minera de Cartagena-La Unión**", realizada por D^a **Mari Luz García Lorenzo**, bajo mi inmediata dirección y supervisión, y que presenta para la obtención del grado de Doctor por la Universidad de Murcia.

En Murcia, a 20 de julio de 2009



D^a **MARÍA JOSÉ MARTÍNEZ SÁNCHEZ**, Profesora Titular de Universidad del Área de Edafología en el Departamento de Química Agrícola, Geología y Edafología, AUTORIZA:

La presentación de la Tesis Doctoral titulada "**Evaluación de la contaminación por vía hídrica de elementos traza en áreas con influencia de actividades minero-metalúrgicas. Aplicación a la Sierra Minera de Cartagena-La Unión**", realizada por D^a **Mari Luz García Lorenzo**, bajo mi inmediata dirección y supervisión, y que presenta para la obtención del grado de Doctor por la Universidad de Murcia.

En Murcia, a 20 de julio de 2009



D. **LUIS ALMELA RUIZ**, Catedrático de Universidad del Área de Edafología y Química Agrícola y Director del Departamento de Química Agrícola, Geología y Edafología,

INFORMA:

Que la Tesis Doctoral titulada "**Evaluación de la contaminación por vía hídrica de elementos traza en áreas con influencia de actividades minero-metalúrgicas. Aplicación a la Sierra Minera de Cartagena-La Unión**", ha sido realizada por D^a **Mari Luz García Lorenzo**, bajo la inmediata supervisión de D^a Carmen Pérez Sirvent y D^a María José Martínez Sánchez, y que el Departamento ha dado su conformidad para que sea presentada ante la Comisión de Doctorado.

En Murcia, a 20 de julio de 2009

Es curioso cuantas veces durante los últimos meses he pensado en los agradecimientos que formarían parte de esta tesis, tantas personas que han pasado por mi mente...Sin embargo, ahora que ha llegado el momento, esta hoja en blanco representa el estado en que ahora me siento, quizá porque se acerca el final de una etapa, y los cambios siempre asustan.

Esta tesis representa algo más que ella misma, es un trozo de mi vida, y por eso no es extraño que se agolpen en mi mente tantos agradecimientos.

Quiero expresar mi gratitud a las Doctoras Carmen Pérez Sirvent y M^a José Martínez Sánchez, directoras de este trabajo, por la confianza que depositaron en mi, por haberme guiado durante todo este tiempo y por el esfuerzo que han realizado para que este trabajo viera la luz.

A mis compañeros, que han sido parte importante de este trabajo y cuya colaboración ha sido indispensable. A todos lo que están actualmente en el grupo de investigación, Eva, William, Inés, Ascen, Víctor, Salvi y Lucía, y a los que ya han dejado atrás la vida del becario pero que fueron muy importantes en mis inicios, Jorge, Cortes, Pedro, Chema y Rosendo.

A Joaquín, a Mariajo, a Paula, a Juani y a Rosa, que además de compañeros son grandes amigos.

A todos los miembros del Departamento de Química Agrícola, Geología y Edafología que han manifestado su interés por esta tesis.

A Feli, porque sin ella cada mañana preguntándome ¿cuánto te falta para terminar? seguro que habría tardado más.

Al Doctor José Molina, o mejor dicho a Pepe, que sabe tanto de esta tesis que en parte es un poquito suya. Gracias por ayudarme en toda la parte geográfica, pero sobre todo gracias por tu apoyo, por tu amistad, tu optimismo y por estar ahí siempre. Ha sido un placer compartir contigo las interminables horas de trabajo y sobre todo las aventuras de los congresos.

A Manuel Hernández Córdoba e Ignacio López García por sus consejos y paciencia ante las dificultades.

A Paula Carey y Nicola Senesi, supervisores de mis estancias en la Universidad de Greenwich y Bari respectivamente, por su apoyo para realizar esta tesis dentro del marco europeo.

A la Fundación Séneca por la concesión de la beca, gracias a la cual he tenido la oportunidad de realizar este trabajo con el que he disfrutado tanto.

A Juan, Bombis, Bea, Paco, Álvaro, Javi, Blaya, Esther, Guille, Cristóbal, Chiqui, Marifran, Lucas y a las niñas de ambientales, porque aún pensando que la vida del doctorando es la mejor, habéis comprendido el esfuerzo que supone realizar una tesis.

A Ana, para ti una mención especial, ya que tu apoyo ha sido imprescindible, gracias por estar ahí siempre, gracias por tus consejos y por tu paciencia y por las miles de risas cuando todo parecía imposible.

Y en último lugar, pero no por ello menos importantes, mi familia.

Quiero empezar por mi abuela, que espera ansiosa a que termine y por fin tener una nieta doctora. A mi tía María José y el resto de miembros de mi familia, por darme aliento.

A Paco y Rafael, mis hermanos, por vuestro apoyo, vuestro amor y comprensión. A mis tres sobrinos, porque algún día entenderán qué hacía su tía yendo al "cole" a los 28 años.

A Lola, mi hermana, que ha venido a verme en todos mis periplos europeos, que me ha dado tanto ánimo, tanto cariño y tanta alegría que es imposible resumir en una frase toda mi gratitud. Su apoyo incondicional en mis decisiones y su fe en mí ha suplido con creces los momentos de debilidad a lo largo de esta trayectoria.

A mis padres, Paco y Angelina, porque sin vosotros no estaría aquí, porque jamás habéis permitido que me pusiera un límite, porque habéis creído en mí desde el principio e incluso en los momentos en los que yo misma me he encontrado perdida, por vuestra paciencia, porque habéis luchado para que este sueño por fin se haya hecho real, porque con vosotros cerca todo ha sido más fácil, os debo tanto...

Mis disculpas agradecidas a todos los olvidados que han compartido y colaborado en esta tesis.

"Quod severis metes"



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.	3
1.1. LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO Y SU ENTORNO. CONCEPTOS GENERALES.	3
1.2. CONTAMINACIÓN DEL SUELO POR ELEMENTOS TRAZA.	5
1.2.1. Origen de los elementos traza en el suelo.	6
1.3. ACTIVIDAD MINERA Y CONTAMINACIÓN POR ELEMENTOS TRAZA.	8
1.4. IMPACTO SOBRE EL MEDIO AMBIENTE DE LAS ACTIVIDADES MINERO-METALÚRGICAS.	12
1.4.1. Impacto sobre el suelo.	12
1.4.2. Impacto sobre la vegetación.	13
1.4.3. Impacto sobre la fauna.	13
1.4.4. Impacto sobre el paisaje.	14
1.4.5. Impacto sobre los recursos hídricos.	14
1.4.6. Impacto ambiental por diferentes formas de energía.	14
1.4.7. Impacto en la atmósfera.	15
1.4.8. Variación de la morfología del terreno.	15
1.5. DRENAJE ÁCIDO DE MINAS.	16
2. OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN.	21
3. PLAN DE TRABAJO.	25
4. ZONA DE ESTUDIO.	29
4.1. LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS FISIGRÁFICAS.	29
4.2. FIGURAS DE PROTECCIÓN EN LA ZONA DE ESTUDIO.	30
4.3. ASPECTOS CLIMÁTICOS.	31
4.4. CONTEXTO GEOLÓGICO.	37
4.4.1. Complejo Nevado-Filábride.	37
4.4.2. Complejo Alpujárride.	38
4.4.3. Complejo Maláguide.	38

4.4.4. Serie Neógena.	38
4.4.5. Cuaternario.	39
4.5. HIDROLOGÍA.	39
4.6. MINERALOGÍA.	41
4.7. CONTEXTO EDAFOLÓGICO.	44
4.7.1. Campo de Cartagena.	44
4.7.2. Sierra Minera Cartagena-La Unión.	46
4.8. VEGETACIÓN Y ACTIVIDADES AGRÍCOLAS.	51
4.8.1. Marco biogeográfico.	51
4.8.2. Vegetación potencial.	51
4.8.3. Vegetación actual y actividades agrícolas.	54
4.9. LA MINERÍA EN LA SIERRA DE CARTAGENA- LA UNIÓN.	56
4.9.1. Explotación minera en la zona.	56
4.9.2. Tipología de los yacimientos.	59
4.9.3. Métodos de explotación.	62
4.9.4. Procesos mineralúrgicos. Procesos de concentración.	63
4.9.5. Impactos producidos por la actividad minera en la zona.	64
5. DISEÑO DE MUESTREO Y RECOGIDA DE MUESTRAS.	69
5.1. SELECCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.	69
5.2. SELECCIÓN DE ZONAS DE MUESTREO.	77
5.2.1. Lo Poyo (Zona A).	80
5.2.2. Llano del Beal (Zona B).	82
5.2.3. Cabezo Rajao (Zona C).	83
5.2.4. El Gorguel (Zona D).	85
5.2.5. Portman (Zona E).	86
5.3. PUNTOS DE MUESTREO Y TIPOS DE MUESTRAS.	88
5.4. RECOGIDA DE MUESTRAS.	94

5.4.1. Muestras de agua de escorrentía.	94
5.4.2. Muestras de sedimento.	95
5.4.3. Muestras de sedimento saturadas en agua.	96
5.4.4. Muestras de suelo y vegetales.	96
6. METODOLOGÍA.	99
6.1. SEDIMENTOS Y SUELOS.	99
6.1.1. Descripción de las muestras.	99
6.1.2. Determinaciones analíticas generales.	99
6.1.3. Análisis granulométrico.	100
6.1.4. Difracción de Rayos X.	101
6.1.5. Análisis termogravimétrico.	104
6.1.6 Análisis químico total.	105
6.1.7. Determinación de elementos traza.	106
6.2. AGUAS Y AGUAS DE PORO.	110
6.2.1. Obtención del agua de poro.	110
6.2.2. Determinaciones analíticas generales.	111
6.2.3. Determinación de iones solubles.	111
6.2.4. Determinación de la especiación química en la solución acuosa.	113
6.3. MATERIAL VEGETAL.	114
6.4. DETERMINACIÓN ANALÍTICA DEL CONTENIDO EN ELEMENTOS TRAZA. CONDICIONES EXPERIMENTALES Y PARÁMETROS INSTRUMENTALES.	115
6.4.1. Determinación analítica del contenido total de Zn, Pb, Fe, Cd, Cu y Mn.	115
6.4.2. Determinación analítica del contenido de Al.	118
6.4.3. Determinación analítica del contenido total de As y Hg.	118
6.5. ENSAYOS DE TOXICIDAD.	119
6.5.1. Bioensayo Microtox®.	120
6.5.2. Bioensayo Phytotoxkit®.	122
6.5.3. Bioensayo Ostracodtoxkit®.	124

6.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.	125
6.6.1. Análisis univariante.	125
6.6.2. Análisis multivariante.	125
6.7. METODOLOGÍA SIG.	127
7. PROCESOS DE METEORIZACIÓN TRANSPORTE Y SEDIMENTACIÓN.	131
7.1. PROCESOS DE METEORIZACIÓN, TRANSPORTE Y SEDIMENTACIÓN EN MATERIALES CON ALTO CONTENIDO EN ELEMENTOS TRAZA EN EL ÁREA DE LA SIERRA MINERA Y SU ZONA DE INFLUENCIA.	133
7.1.1. Procesos de meteorización.	134
7.1.2. Procesos de erosión y transporte.	136
7.1.3. Procesos de sedimentación.	141
7.2. REACCIONES Y PRODUCTOS.	143
7.2.1. Reacciones y productos de la oxidación.	143
7.2.2. Reacciones y productos de la hidratación.	144
7.2.3. Reacciones y productos de la hidrólisis.	146
7.2.4. Reacciones y productos de la neutralización.	146
7.2.5. Reacciones y productos de adsorción/desorción y complejación.	147
7.2.6. Reacciones y productos del drenaje ácido de minas.	149
8. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MINERALÓGICA DE LOS MATERIALES ESTUDIADOS.	163
8.1. ZONA A (LO POYO).	163
8.1.1. Contaminación primaria.	163
8.1.2. Contaminación secundaria.	165
8.1.3. Contaminación terciaria.	167
8.1.4. Muestras con origen diferente.	169
8.1.5. Punto de muestreo control.	171
8.1.6. Análisis estadístico.	172
8.1.7. Modelo conceptual de dispersión hídrica de la contaminación.	182
8.2. ZONA B (LLANO DEL BEAL).	184

8.2.1. Contaminación primaria.	184
8.2.2. Contaminación secundaria.	186
8.2.3. Contaminación terciaria.	188
8.2.4. Muestras con origen diferente.	191
8.2.5. Punto de muestreo control.	192
8.2.6. Análisis estadístico.	193
8.2.7. Modelo conceptual de dispersión hídrica de la contaminación.	203
8.3. ZONA C (CABEZO RAJAO).	204
8.3.1. Contaminación primaria.	204
8.3.2. Punto de muestreo control.	207
8.3.3. Análisis estadístico.	209
8.3.4. Modelo conceptual de dispersión hídrica de la contaminación.	216
8.4. ZONA D (GORGUEL).	217
8.4.1. Contaminación primaria.	217
8.4.2. Contaminación secundaria.	221
8.4.3. Punto de muestreo control.	223
8.4.4. Análisis estadístico.	225
8.4.5. Modelo conceptual de dispersión hídrica de la contaminación.	232
8.5. ZONA E (PORTMAN).	233
8.5.1. Contaminación primaria.	233
8.5.2. Contaminación secundaria.	234
8.5.3. Contaminación terciaria.	236
8.5.4. Sin influencia minera.	238
8.5.5. Punto de muestreo control.	239
8.5.6. Análisis estadístico.	240
8.5.7. Modelo conceptual de dispersión hídrica de la contaminación.	248
8.6. ESTUDIO DE LAS VARIACIONES EN ELEMENTOS TRAZA EN LAS DISTINTAS ZONAS.	250

9. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LAS AGUAS SUPERFICIALES.	253
9.1. ZONA A- LO POYO.	253
9.1.1. Contaminación primaria.	253
9.1.2. Contaminación secundaria.	254
9.1.3. Contaminación terciaria.	255
9.1.4. Muestras con origen diferente.	255
9.2. ZONA B- LLANO DEL BEAL.	257
9.2.1. Contaminación primaria.	257
9.3. ZONA C- CABEZO RAJAO.	259
9.3.1. Contaminación primaria.	259
9.4. ZONA D- EL GORGUEL.	261
9.4.1. Contaminación primaria.	261
9.4.2. Contaminación secundaria.	262
9.5. ZONA E- PORTMAN.	264
9.5.1. Contaminación primaria.	264
9.5.2. Contaminación terciaria.	264
9.5.3. No influidas por la actividad minera.	265
9.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.	266
10. MOVILIDAD NATURAL Y MOVILIZACIÓN POTENCIAL DE ELEMENTOS TRAZA.	273
10.1. MOVILIDAD DE ELEMENTOS TRAZA.	273
10.2. EVALUACIÓN DE LA MOVILIZACIÓN DE ELEMENTOS TRAZA EN EL SUELO.	276
10.2.1. Arsénico.	277
10.2.2. Cadmio.	279
10.2.3. Cinc.	281
10.2.4. Cobre.	282
10.2.5. Hierro.	283

10.2.6. Manganeso.	285
10.2.7. Mercurio.	286
10.2.8. Plomo.	287
10.3. MOVILIDAD NATURAL DE ELEMENTOS TRAZA EN LOS MATERIALES ESTUDIADOS.	289
10.3.1. Extracción en agua.	289
10.3.2. Aguas de poro.	302
10.3.3. Extraíbles en DTPA.	308
10.4. MOVILIDAD POTENCIAL DE ELEMENTOS TRAZA.	311
10.4.1. Extracción en medio ácido.	311
10.4.2. Extracción en medio complejante-reductor.	321
10.4.3. Extracción en medio oxidante.	334
11. TRANSFERENCIA DE ELEMENTOS TRAZA A RECEPTORES VIVOS.	347
11.1. INTRODUCCIÓN.	347
11.2. BIOENSAYO MICROTOX®.	349
11.2.1. Aguas superficiales.	349
11.2.2. Aguas de poro.	352
11.3. BIOENSAYO DE FITOTOXICIDAD.	354
11.3.1. Zona A- Lo Poyo.	354
11.3.2. Zona B- Llano del Beal.	356
11.3.3. Zona C- Cabezo Rajao.	359
11.3.4. Zona D- Gorguel.	361
11.3.5. Zona E- Portman.	363
11.3.6. Análisis estadístico de los resultados.	365
11.4. BIOENSAYO DE TOXICIDAD EN OSTRACODOS.	366
11.4.1. Zona A- Lo Poyo.	366
11.4.2. Zona B- Llano del Beal.	367
11.4.3. Zona C- Cabezo Rajao.	368
11.4.4. Zona D- Gorguel.	369

11.4.5. Zona E- Portman.	370
11.4.6. Análisis estadístico de los resultados.	371
11.5. TRANSFERENCIA DE ELEMENTOS TRAZA A PLANTAS NATURALES.	373
11.5.1. <i>Limonium carthaginens</i> .	377
11.5.2. <i>Dittrichia viscosa</i> .	379
11.5.3. <i>Zygophyllum fabago</i> .	381
11.5.4. <i>Glaucium flavum</i> .	382
11.5.5. <i>Arthrocnemum macrostachyum</i> .	383
11.6. TRANSFERENCIA DE ELEMENTOS TRAZA A LA ESPECIE HUMANA.	386
11.6.1. Factores que influyen en la biodisponibilidad de los elementos traza en el suelo.	388
11.6.2. Métodos para evaluar la biodisponibilidad relativa de metales pesados en el suelo.	389
11.6.3. Movilización de elementos traza en tracto gastrointestinal.	391
12. CONCLUSIONES.	395
13. BIBLIOGRAFÍA.	403
14. SUMMARY.	429
14.1. INTRODUCTION.	429
14.2. STUDY AREA.	431
14.3. MATERIAL AND METHODS.	431
14.4. RESULTS AND DISCUSSION.	435
15. CONCLUSIONS.	443



RESUMEN

Resumen.

La actividad minera, como la mayoría de las actividades antrópicas, ha supuesto una alteración en el medio natural que hace algunos años no se percibía como un factor de riesgo.

El objetivo de esta tesis es identificar los contaminantes, las vías de dispersión hídrica y las zonas de recepción principales de elementos traza en la Sierra Minera y sus zonas de influencia, con el fin de establecer un modelo conceptual de dispersión de estos elementos.

Los puntos fundamentales que se han abordado son: caracterizar el material de la zona de estudio, tanto sedimentos como aguas superficiales; evaluar la movilidad natural y movilización potencial de los elementos bajo distintas condiciones medioambientales; estudiar la toxicidad de estos residuos en diferentes organismos y estimar la biodisponibilidad por vía ingesta al ser humano.

Los resultados obtenidos permiten establecer zonas afectadas por contaminación primaria, secundaria y terciaria, en función de su cercanía con los focos contaminantes y la existencia de procesos de atenuación natural de la contaminación por mezcla con materiales circundantes.

Abstract.

Mining activities represent a current source of pollution, since trace elements are introduced into the atmospheric, terrestrial and aquatic ecosystems.

The aim of this Thesis is to identify contaminants, hydric dispersion ways and reception areas of trace elements in the mining district of Sierra Minera Cartagena- La Unión and its influence area.

In addition, a conceptual model of trace element dispersion has been established.

The key points that have been addressed are: chemical and mineralogical characterization of sediments, chemical characterization of superficial waters; evaluation of natural and potential mobility of trace elements in different environmental conditions; toxicity evaluation in different organisms and bioavailability estimation by human intake.

Obtained results allowed to establish points affected by primary, secondary and tertiary contamination, according to their proximity to contamination sources and as a function of attenuation processes that could take place in the studied area with mixing with surrounding materials.



1. INTRODUCCIÓN

1.1. La contaminación del suelo y su entorno. Conceptos generales.

El suelo se forma por la interacción de los sistemas atmósfera, biosfera e hidrosfera sobre la superficie de la geosfera. Ocupa la interfase entre la geosfera y los demás sistemas en la llamada zona crítica (Brantley et al., 2007; National Research Council, 2001), la parte más dinámica de la superficie terrestre.

Constituye una cubierta delgada en la superficie terrestre, de unos pocos centímetros a varios metros. Los suelos son unidades funcionales resultantes de la acción combinada de factores ecológicos de formación: material original, clima, organismos vivos, geomorfología y tiempo (Porta et al., 2008). Tras un largo periodo de meteorización, y bajo condiciones climáticas estables, el suelo puede alcanzar un equilibrio.

Sin embargo, cuando alguno de los parámetros del sistema se modifica, como por ejemplo, por la actuación del hombre, este equilibrio se rompe, dando lugar a fenómenos de degradación (Galán y Romero, 2008). Entre los distintos tipos de degradación se incluye la contaminación del suelo, que se produce cuando hay un incremento en la concentración de una o varias sustancias potencialmente tóxicas, ya sean minerales (metales pesados y sus compuestos, materiales radiactivos) u orgánicas (xenobióticos: fitosanitarios, dioxinas, hidrocarburos, etc), procedentes de actividades humanas.

La contaminación del suelo puede deberse a un amplio rango de fuentes, que pueden ser tanto puntuales como difusas y que pueden agruparse en (Figura 1.1):

- Fuentes agroquímicas: los contaminantes procedentes de fuentes agroquímicas incluyen fertilizantes, estiércol y plaguicidas. A éstos pueden añadirse vertidos accidentales de hidrocarburos de la maquinaria agrícola.
- Fuentes urbanas: La contaminación del suelo por esta vía se produce por la combustión en plantas generadoras de energía, emisiones de los vehículos y eliminación de residuos.
- Fuentes industriales: estas fuentes son quizá las que mayor contaminación local del suelo pueden producir, siendo muy numerosas

las actividades posibles. Entre las actividades industriales que favorecen la contaminación del suelo se encuentran las actividades mineras, que no sólo producen contaminación local sino, además, muy importante, la contaminación difusa. Además de la actividad minera, la generación de electricidad y otras actividades industriales, así como la industria química pueden contaminar el suelo. La contaminación por actividad industrial puede producirse por deposición aérea y emisiones gaseosas, como en el caso de fundiciones, o bien por contaminación de las aguas, como en el caso de la minería o los curtidos. Para la contaminación por actividades industriales existe legislación *ad hoc*, comprendida en la Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos, en los artículos 27 y 28 y en el Real Decreto 9/2005, de 14 de enero, por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados.

- Fuentes atmosféricas: los contaminantes pueden ser transportados en la atmósfera, constituyendo una de las principales vías de dispersión de partículas, que posteriormente pueden llegar al suelo por deposición ácida.
- Fuentes accidentales: en ellas se engloban tanto accidentes como la contaminación producida por actividades militares, explosiones o gases nocivos.

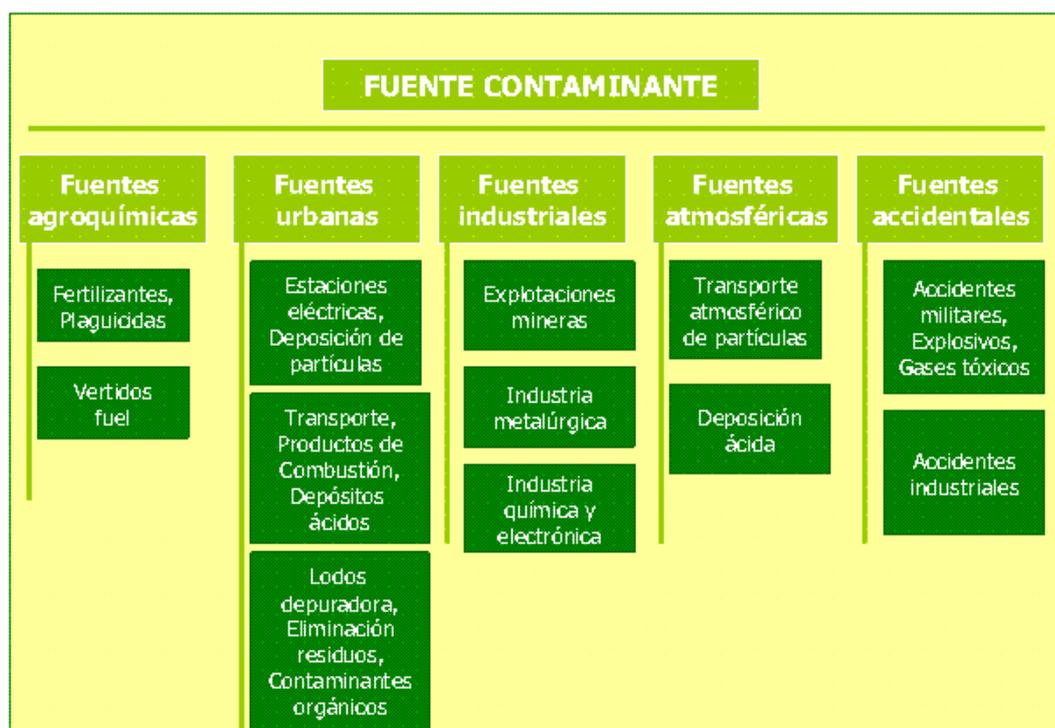


Figura 1.1. Fuentes de contaminación del suelo

1.2. Contaminación del suelo por elementos traza.

De manera general, se considera metal pesado a aquel elemento que tiene una densidad igual o superior a 6 gr/cm^3 cuando está en forma elemental (Kabata-Pendias y Pendias, 1992), o cuyo número atómico es superior a 20 (excluyendo alcalinos y alcalino-térreos).

Junto a estos metales pesados hay otros elementos químicos que aunque son metales ligeros o no metales se suelen englobar con ellos por presentar orígenes y comportamientos asociados; es el caso del arsénico, bario, boro y selenio. Por ello, resulta mejor hablar de elementos traza.

Los elementos traza más abundantes en los suelos pueden clasificarse en cinco categorías, según la forma química en la que aparecen en la solución del suelo (Galán y Romero, 2008):

1. Cationes: Ag^+ , Cd^{+2} , Co^{+2} , Cr^{+3} , Cu^{+2} , Hg^{+2} , Ni^{+2} , Pb^{+2} , Zn^{+2} .
2. Metales nativos: Hg, V.
3. Oxianiones: AsO_3^{-3} , CrO_4^{-2} , MnO_4^{-2} , HSeO_3^- , SeO_4^{-2} .
4. Halogenuros: F, Cl, Br, I.

5. Organocomplejos: Ag, As, Hg, Se, Te, Tl.

Estas categorías no son excluyentes, ya que el mismo elemento puede aparecer en más de una forma.

Los elementos traza están presentes en bajas concentraciones en la corteza terrestre, suelos y plantas. Muchos de ellos son esenciales para el crecimiento y desarrollo de plantas, animales y el ser humano, aunque pueden ser tóxicos si se superan ciertos umbrales.

De todos los elementos traza encontrados en el suelo, hay 17 que presentan elevada biodisponibilidad, por lo pueden considerarse potencialmente tóxicos para los organismos. Éstos son: Ag, As, Bi, Cd, Co, Cu, Hg, Ni, Pb, Pd, Pt, Sb, Se, Sn, Te, Tl y Zn (Galán y Romero, 2008).

La EPA (US Environmental Agency) incluye en la lista de contaminantes prioritarios los siguientes elementos: Ag, As, Be, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb, Se, Tl y Zn.

1.2.1. Origen de los elementos traza en el suelo.

La concentración de elementos traza en el suelo puede relacionarse, por un lado, con la composición del material original y los procesos edafogénicos, y por otro lado, con la actividad humana (Martínez-Sánchez et al., 2007).

Los aportes locales provienen de lugares o emplazamientos contaminados y aparecen en las zonas que rodean a la fuente contaminante, en las que existe una relación directa con el origen de la contaminación. Van unidos, generalmente, a la minería, las actividades industriales, vertederos y otras instalaciones, tanto en funcionamiento como tras el cierre.

Los aportes difusos están asociados habitualmente con la dispersión de elementos traza, tanto solubles como particulados, a lo largo de amplias zonas con frecuencia alejadas de la fuente de origen, relacionados con la deposición hídrica y eólica (Figura 1.2):

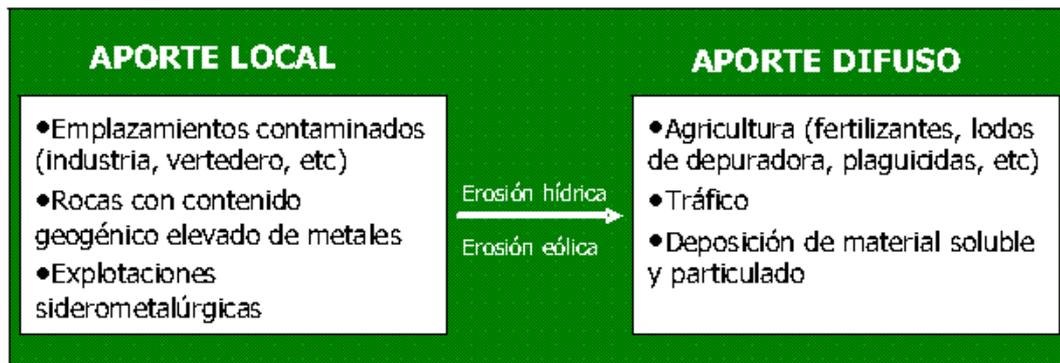


Figura 1.2. Aporte de elementos traza al suelo (Martínez-Sánchez et al., 2007)

1.2.1.1. Origen natural.

La primera causa de aporte de elementos traza al suelo, de forma natural, es la propia alteración mineral durante los procesos de edafogénesis. Existen algunas rocas cuyo contenido en determinados elementos es especialmente alto, y los suelos que sobre ellas se desarrollan heredan esa elevada concentración.

Entre los tipos de rocas, las ígneas ultrabásicas son las que mayor contenido en elementos traza presentan, seguidas de las ígneas básicas. Por otro lado, las rocas que menor contenido en elementos traza presentan suelen ser las ígneas ácidas y las rocas sedimentarias (Martínez-Sánchez et al., 2007).

1.2.1.2. Origen antrópico.

Los elementos traza forman parte de los ciclos biogeoquímicos que determinan su presencia y concentración en las distintas partes del medio ambiente (agua, aire, suelo y biota). Las actividades humanas alteran estos ciclos y modifican la concentración y posterior distribución al resto de compartimentos ambientales (Moreno Grau, 2003). La actuación sobre estos elementos consiste, por un lado en introducirlos en el medio ambiente, y por otro, en modificar la forma química o bioquímica en que éstos se encuentran.

1.3. Actividad minera y contaminación por elementos traza.

La explotación de los recursos minerales es, y ha sido, una de las actividades más importantes para el desarrollo de la humanidad. Desde los tiempos prehistóricos hasta la actualidad, la explotación y el uso de rocas y minerales ha tenido un papel muy importante en el desarrollo tecnológico e industrial.

La extracción de estos recursos conlleva una serie de alteraciones medioambientales que a veces pueden llegar a ser muy negativas, en especial en la transformación del paisaje, el drenaje ácido de minas y la degradación de los suelos, sin olvidar la huella socioeconómica y cultural que ha dejado la minería en la historia de las comarcas mineras (El Khalil et al., 2008).

Dentro de las alteraciones que produce la minería en el medio, el impacto en los suelos es de gran importancia, tanto por la propia ocupación del suelo fértil por la explotación, escombreras, plantas de tratamiento etc., como por las alteraciones que se producen durante la actividad minera: depósito de partículas sedimentadas o traídas por las aguas de lluvia y el propio drenaje ácido de minas, ya que la actividad minera en su conjunto produce y ha producido toda una serie de contaminantes gaseosos, líquidos y sólidos (Chopin y Alloway, 2007).

Además, hay que considerar los residuos generados en esta actividad. En el pasado, la mayoría de residuos de la minería eran eliminados sin control, de manera que estas prácticas han producido que zonas abandonadas, en las que se llevó a cabo una actividad minera, se hayan convertido en focos potenciales de contaminación (Younger et al., 2002).

Los residuos procedentes de la actividad minera pueden clasificarse en (Lottermoser, 2007):

- **Residuos mineros:** en ellos ya no aparecen los elementos de interés extractivo o su concentración no es significativa. En general son materiales geológicamente heterogéneos y de granulometría variable. Las características físicas y químicas de estos residuos dependen de su

mineralogía y características geoquímicas, de la maquinaria empleada en la extracción y tratamiento, del tamaño de partícula del material extraído y del contenido en humedad. Las fuentes principales son rocas, sedimentos y suelos de la superficie y en menor grado materiales procedentes de zonas profundas.

- **Residuos del procesado:** Los materiales son tratados mediante técnicas físicas, entre las que se incluyen: lavado, tamizado, uso de materiales magnéticos y adición de productos que faciliten la separación de la mena durante la flotación. Todos estos procesos generan residuos, cuyas características dependen de la mineralogía y tamaño de partícula de los materiales extraídos, así como de los procesos a los que se han sometido durante el tratamiento. Estos residuos pueden emplearse posteriormente para rellenar huecos en la zona explotada, en el caso de que sean sólidos, o en pilas cuando están en forma líquida o como lodos.
- **Aguas de mina:** Tanto durante la extracción como durante el tratamiento se emplea y desecha agua. Las aguas de mina incluyen tanto aguas superficiales como subterráneas y producen reacciones con los minerales en la zona. En general estas aguas son de baja calidad, de ahí la importancia de su gestión para una correcta eliminación. El caso extremo de aguas de baja calidad procedentes de la actividad minera son las aguas de drenaje ácido de minas.

La producción mundial de minerales en el año 1999 viene recogida en la Tabla 1.1:

	Producción	Minerales con interés industrial	Producción
Antimonio	0,122 Mt	Asbesto	1,93 Mt
As ₂ O ₃	38800 t	Barita	5,66 Mt
Bauxita	127 Mt	Minerales de boro	6,37 Mt
Berilo	6210 t	Cemento	1610 Mt
Cromita	14 Mt	Bentonita	9,82 Mt
Cobalto	29900 t	Arcillas altamente absorbentes	3,52 Mt
Cobre	12,6 Mt	Caolinita	41,6 Mt
Oro	2540 t	Feldespatos	8,98 Mt
Hierro	990 Mt	Fluorita	4,51 Mt
Plomo	3,02 Mt	Grafito	0,685 Mt
Manganeso	20,4 Mt	Yeso	106 Mt
Mercurio	1800 t	CaO	141 Mt
Molibdeno	0,123 Mt	Magnesita	10,7 Mt
Níquel	1,12 Mt	Mica	0,304 Mt
Niobio-tántalo	57100 t	Turba	27,2 Mt
Platino	379 t	Perlita	1,85 Mt
Plata	17700 t	Fosfatos	141 Mt
Estaño	0,198 Mt	Potasas	25,7 Mt
Titanio	4,17 Mt	Halita	209 Mt
Tungsteno	31000 t	Arenas y gravas	107 Mt
Vanadio	42200 t	Azufre	57,1 Mt
Cinc	8,04 Mt	Vermiculita	0,534 Mt

Tabla 1.1. Producción mundial de minerales en 1999 (Lottermoser, 2007)

Las técnicas de extracción y tratamiento de minerales que se emplean actualmente son bastante eficaces y los estériles que se producen contienen concentraciones de elementos traza relativamente bajas. Sin embargo, los estériles de las explotaciones mineras más antiguas presentan contenidos en elementos traza muy elevados, debido a procesos de separación menos eficaces.

Restos de estos estériles, que pueden ser transportados por el viento o el agua, constituyen una importante fuente de contaminación, tanto en los suelos como en las aguas que se hallan en los alrededores de las minas, además de en los suelos de las zonas aluviales que se encuentran aguas abajo (El Khalil et al., 2008; Pérez-Sirvent et al., 1999), viéndose afectados la flora, fauna y la especie humana.

Por tanto, la contaminación por elementos traza en zonas con actividad minera presenta tres problemas fundamentales: no pueden ser biodegradados, pueden ser transportados por agentes activos y pueden ser acumulados por los organismos vivos (Mlayah et al., 2009).

Para el caso concreto de la vegetación que crece en emplazamientos contaminados, la concentración de elementos traza puede ser alta, no sólo en las hojas sino también en las ramas (González-Díaz et al., 2008) y en ocasiones causar riesgos severos en la salud de la población (Lee et al., 2006).

Entre los principales riesgos a los que se expone la especie humana como consecuencia la actividad minera destacan la inhalación e ingestión de polvo y suelo contaminado por elementos traza, la absorción por contacto dérmico y el consumo de agua y alimentos contaminados.

Se han establecido tres tipos de contaminación derivados de la extracción de metales a gran escala (Figura 1.3).

- **Contaminación primaria:** constituida por los residuos producidos durante la extracción, molienda y fundición y que son depositados próximos a la fuente de origen, en escombreras o balsas de estériles, presentando diferente grado de contaminación en función de la procedencia de dichos residuos.
- **Contaminación secundaria:** se produce como consecuencia del transporte de los contaminantes fuera de sus zonas de producción, a través del agua y el viento, a suelos, aguas superficiales y subterráneas, tanto de material particulado como de los productos de alteración de los residuos antes mencionados.
- **Contaminación terciaria:** supone una movilización de los contaminantes a varios kilómetros de su origen.

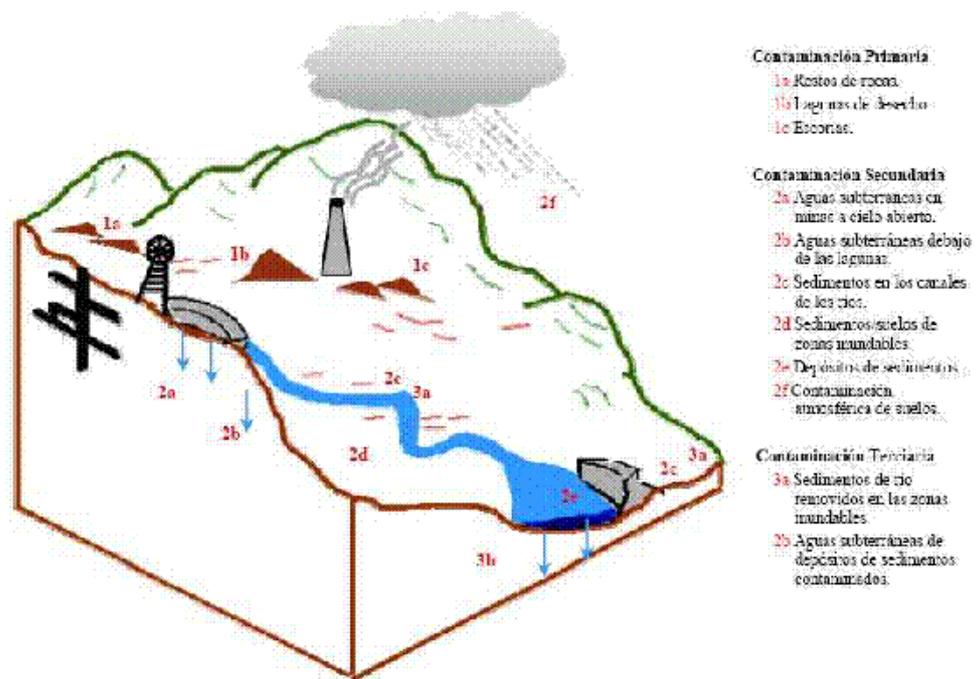


Figura 1.3. Tipos de contaminación derivados de la extracción de metales a gran escala. Modificado de Moore y Luoma, 1990, y Farmer y Graham, 2003.

1.4. Impacto sobre el medio ambiente de las actividades minero-metalúrgicas.

La actividad minero-metalúrgica actual puede causar diferentes impactos sobre el medio ambiente y sus ecosistemas:

1.4.1. Impacto sobre el suelo.

La actividad minera puede influir negativamente a los suelos, que pueden ser destruidos, degradados o alcanzados por diversos contaminantes (elementos traza, compuestos tóxicos, isótopos radiactivos), por aguas ácidas, por sedimentos que los alteren o por gases nocivos (Molina Ruiz, 2000)

Los principales impactos sobre el suelo son:

- Destrucción total o parcial del suelo. Es el impacto potencial más importante. La actividad minera a cielo abierto actúa sobre el suelo

modificando su estructura, en el mejor de los casos, o destruyéndolo de forma irreparable.

- **Compactación del suelo.** La utilización de maquinaria pesada en los procesos de extracción compacta el suelo, reduciendo la aireación, capacidad de infiltración y permeabilidad, produciendo de esta forma la disminución del crecimiento de las plantas y el aumento de la escorrentía y erosión superficial.
- **Erosión del suelo.** La eliminación de la vegetación y la agitación y desmenuzamiento de las partículas de suelo por la maquinaria expone los suelos a fenómenos de erosión, cuya intensidad depende de diversos factores, como son la pendiente, la erosionabilidad del suelo, el tiempo necesario para la revegetación y la cantidad e intensidad de las lluvias. El efecto de la erosión es doble: un descenso de la fertilidad del suelo cuando se arranca la capa superficial más fértil, y sedimentación en los cursos de agua receptores de material erosionado. Por otra parte, la existencia de escombreras en laderas con fuerte pendiente intensifica los procesos de erosión y transporte de materiales sueltos, así como agrava los peligros de deslizamientos.
- **Modificación de red de drenaje natural del suelo.** Debido bien a los procesos de arranque de material o bien a la deposición de los residuos en ladera.

1.4.2. Impacto sobre la vegetación.

La cubierta vegetal puede verse afectada por la actividad minera, con efectos que van desde la pérdida de la producción primaria hasta la práctica desaparición de la misma.

1.4.3. Impacto sobre la fauna.

Los principales impactos que tienen lugar sobre la fauna se agrupan en (Molina Ruiz, 2000):

- Destrucción y cambios de tipo de hábitats: supone la desaparición de especies características de los ecosistemas por cambios en los lugares de reposo, alimentación o refugio.
- Efecto barrera: ocasiona una disminución del tamaño poblacional de las especies, con el consiguiente riesgo de extinción, y una división del dominio vital de las especies.
- Eliminación o alteración de los biotopos terrestres.
- Modificación de pautas de comportamiento.
- Perturbaciones por ruidos.

1.4.4. Impacto sobre el paisaje.

Las modificaciones morfológicas se traducen en impactos paisajísticos, frecuentemente agravados por la destrucción o degradación de la vegetación, la ruina de edificios existentes, 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 (Molina Ruiz, 2000). 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.

1.4.5. Impacto sobre los recursos hídricos.

La minería provoca en ocasiones importantes alteraciones sobre las redes de drenaje superficiales y sobre los acuíferos.

1.4.6. Impacto ambiental por diferentes formas de energía.

La incorporación de energía 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 mares, que pueden influir en el desarrollo de nuevas especies. Las oscilaciones de temperatura originan contaminaciones térmicas excesivas o terminales, que pueden llegar incluso a provocar la muerte de los seres vivos acuáticos.

Por otro lado, las vibraciones producidas o generadas por maquinaria pesada, explosivos, movimientos en masa de suelos y rocas pueden producir contaminación acústica (García García, 2004).

1.4.7. Impacto en la atmósfera.

Los procesos de contaminación atmosférica se deben a la emanación de gases, a la incorporación de partículas por la erosión del viento y el vertido de las chimeneas. 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 de estos contaminantes son las escombreras, las balsas de sedimentación, suelos con escasa o nula vegetación, vertidos o escapes de las plantas de tratamiento, talleres, ventilación o vehículos.

1.4.8. Variación de la morfología del terreno.

La morfología local sufre importantes cambios debido al movimiento de tierras, como consecuencia de la construcción de vías de acceso y cortas mineras para la extracción del mineral, apertura de pozos, galerías, zanjas y excavaciones diversas.

Estos volúmenes de tierra o rocas, desmontes, escombreras, balsas de sedimentación y terraplenes están sujetos a movimientos masivos y a fenómenos de erosión por los agentes exógenos.

1.5. Drenaje ácido de minas.

El drenaje ácido de minas se refiere a las aguas resultantes de la disolución oxidativa y lixiviación de sulfuros metálicos, particularmente pirita y marcasita, cuando se exponen artificialmente, por la actividad minera, a las condiciones físico-químicas de la superficie terrestre (Fernández Caliani, 2003).

El drenaje ácido de minas no sólo tiene lugar como consecuencia de la actividad minera, sino que también puede ser un fenómeno natural que tiene lugar en ambientes supergénicos, cuando las rocas contienen sulfuros, o bien éstos afloran en masas expuestas a la meteorización (Fernández Caliani, 2008).

Los dos resultados principales de la interacción entre los sulfuros y el agua en estos ambientes son: la generación de un efluente muy contaminado y el desarrollo de minerales de hierro afectados por alteración supergénica, generalmente hidróxido férrico. Estos minerales supergénicos se denominan precipitados de drenaje ácido de minas, ya que su aparición depende de procesos de evaporación, oxidación, hidrólisis y neutralización en estas aguas (Valente y Leal Gomes, 2009).

En las zonas mineras abandonadas hay elevada diversidad de fuentes potenciales de aguas ácidas, entre las que destacan los desagües de socavones y galerías subterráneas, las escorrentías superficiales de las labores mineras a cielo abierto, las escombreras de estériles, las escorias de fundición, los residuos y cenizas de pirita, las balsas de decantación, lixiviación y flotación.

Los antiguos socavones y galerías subterráneas son focos de contaminación puntual, pero permanente, ya que el desagüe se produce durante casi todo el año.

Las aguas ácidas que drenan zonas con actividad minera subterránea pueden salir a la superficie por gravedad, contaminando los cursos fluviales del entorno con elementos traza, así como las aguas de escorrentía que discurren por las zonas sometidas a minería a cielo abierto (Figura 1.4).

Además, las balsas mineras, que contienen residuos de la flotación, también constituyen un foco importante de contaminación hídrica (Fernández Caliani, 2008).

Entre las principales fuentes de aguas de drenaje ácido se encuentra la minería metálica, la extracción de fosfatos y arenas minerales, en las que los sulfuros pueden oxidarse y producir aguas ácidas. Por otro lado, durante la minería de carbón, el almacenamiento de menas metálicas y de residuos minerales, así como en las pilas de lixiviación puede tener lugar este fenómeno.

En resumen, las aguas de drenaje ácido de mina (DAM) pueden formarse como consecuencia de diversos procesos, tales como:

- El agua empleada en operaciones subterráneas puede ser bombeada a la superficie o llegar a la superficie a través de grietas.
- El agua de lluvia que entra en contacto con los agujeros de mina.
- El agua de lluvia puede infiltrarse a través de pilas de almacenaje, pilas de lixiviación o depósitos de residuos de mina.
- El agua de escorrentía puede reaccionar durante operaciones mineras, metalúrgicas o de procesado.
- Las aguas superficiales y aguas de poro procedentes de pilas de residuos mineros, de pilas de lixiviación y depósitos de residuos de roca pueden infiltrarse hasta llegar a los acuíferos.
- Vertidos controlados o incontrolados de aguas desde las presas y pozos de almacenaje de aguas.



Figura 1.4. Charco en la zona del Gorguel tras un episodio de lluvia

La descarga incontrolada de aguas de drenaje ácido de mina al medio ambiente puede producir impactos en las aguas superficiales y subterráneas, en la vida acuática y en los suelos y sedimentos (Lottermoser, 2007):

- **Aguas superficiales:** el vertido de estas aguas puede afectar a sus usos posteriores (pesca, riego, almacenamiento) aguas abajo del vertido. Además, el abastecimiento de agua potable se ve alterado debido a la baja calidad de estas aguas.
- **Biota acuática:** estas aguas pueden afectar a los organismos fotosintéticos, ya que el sistema bicarbonato se ve alterado y con él la fuente de carbono inorgánico para estos organismos. Por otro lado, el elevado contenido en elementos en forma iónica incrementa la mortalidad tanto en plantas como en animales, disminuyendo la biodiversidad de la zona.
- **Sedimentos:** la precipitación de constituyentes disueltos contamina con metales pesados, metaloides y sales los suelos y sedimentos. Los metales y metaloides pueden aparecer en varias fracciones del sedimento, apareciendo como cationes en: (a) puntos de intercambio, (b) incorporados a carbonatos, (c) incorporados a los óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso, (d) incorporados a los sulfuros o a la materia orgánica y (f) incorporados a los silicatos o a óxidos minerales.
- **Aguas subterráneas:** los impactos sobre las aguas subterráneas son más frecuentes que los producidos sobre aguas superficiales, dependiendo la contaminación de las interacciones entre el suelo, sedimento o matriz con el agua contaminada.



2. OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN

La explotación de los recursos minerales es y, ha sido, una de las actividades más importantes para el desarrollo de la humanidad. Desde los tiempos prehistóricos hasta la actualidad, la explotación y el uso de rocas y minerales ha sido relevante en el desarrollo tecnológico e industrial.

La extracción de estos recursos conlleva una serie de alteraciones medioambientales que a veces pueden llegar a ser muy negativas, en especial en la transformación del paisaje, el drenaje ácido de minas y la degradación de los suelos, sin olvidar la impronta socioeconómica y cultural que ha dejado la minería en las comarcas mineras.

Esta actividad ha originado numerosos focos de contaminación, que afectan a las aguas y suelos del entorno. La actividad minera en su conjunto produce y/o ha producido toda una serie de contaminantes gaseosos, líquidos y sólidos, que de una forma u otra van a parar al suelo.

Dentro de estas alteraciones, el impacto de la minería en los suelos es de gran importancia, tanto por la propia ocupación del suelo fértil como por las alteraciones que se producen durante el desarrollo de la actividad.

Estas alteraciones ocasionan en general la pérdida de fertilidad del suelo, o en el peor de los casos, mantienen su fertilidad pero permiten el paso de los contaminantes a la cadena trófica, incorporándose a los tejidos de animales y/o vegetales. En este último caso, parte de los elementos traza que son adsorbidos por las raíces pueden acumularse en ellas o bien ser transportados rápidamente a la biomasa aérea donde también se almacenan.

El agua es en muchas ocasiones vehículo de transmisión de los procesos de contaminación del suelo, siendo de gran importancia la escorrentía superficial en la zona de estudio, por el régimen de lluvias torrencial, predominando sobre la infiltración. Entre los contaminantes más importantes de las aguas se incluyen los elementos traza, procedentes de la actividad minera desarrollada en la zona.

Con la investigación que se plantea en este estudio se pretende realizar una aproximación al conocimiento general de las principales zonas que están influidas por la actividad minera desarrollada en el Distrito minero de La Unión-Cartagena, tanto en la parte que afecta a la cuenca del Mar Menor como en su vertiente Mediterránea.

Se pretende contribuir al conocimiento científico básico en cuanto a la movilización de elementos traza en residuos procedentes de la minería metálica, muy abundantes tanto en España como en otros países.

Igualmente, se corrobora un esquema metodológico que podrá ser utilizado en diferentes etapas del análisis de riesgos, así como en procesos de descontaminación y recuperación de suelos y espacios contaminados.

El objetivo principal de este trabajo es identificar los contaminantes, vías de dispersión hídrica y zonas de recepción principales de elementos traza en la Sierra Minera y sus zonas de influencia.

Además, se pretende establecer un modelo conceptual de dispersión de elementos traza por vía hídrica en la zona de estudio.

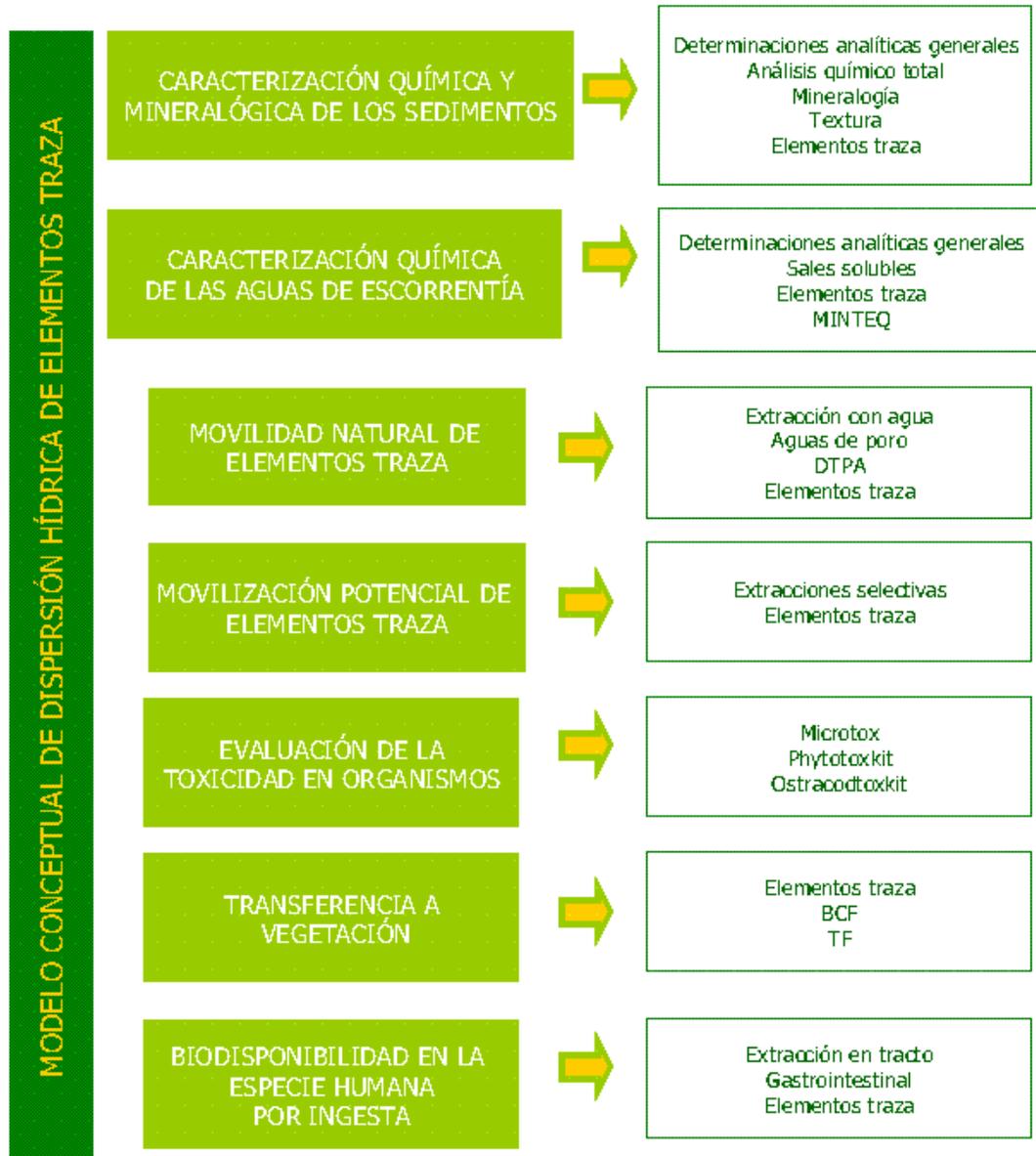
Para la consecución de los mismos se proponen los siguientes objetivos parciales:

1. Caracterización química y mineralógica de los materiales de dispersión hídrica, solubles y particulados.
2. Identificación de procesos y productos de meteorización, transporte y sedimentación en la zona de estudio.
3. Estudio de la movilidad natural y movilización potencial, para estudiar la biodisponibilidad en los organismos.
4. Evaluación de la toxicidad en diferentes organismos.
5. Evaluación de la biodisponibilidad por ingesta.



3. PLAN DE TRABAJO

Para llevar a cabo los objetivos propuestos se siguió el plan de trabajo que se muestra a continuación:





4. ZONA DE ESTUDIO

4.1. Localización y características fisiográficas.

La Sierra Minera de Cartagena-La Unión (Murcia, España) se localiza en el extremo suroriental de la Región de Murcia. Ocupa una extensión aproximada de 100 km², en una banda de 23 km de largo con dirección Este-Oeste desde Cabo de Palos a Cartagena y de 4 km de ancho con dirección Norte-Sur. Se trata de una sierra costera, que limita al Sur con el Mar Mediterráneo y al Norte con el Campo de Cartagena. Los núcleos urbanos desarrollados en este ámbito geográfico son de Este a Oeste: Cabo de Palos, Los Belones, El Estrecho, Llano del Beal, Portman, La Unión, Escombreras y Cartagena (Figura 4.1). La principal zona minera se encuentra en el centro de la Sierra, y ocupa una extensión aproximada de unos 50 km².

El área de influencia de la Sierra Minera, en su vertiente septentrional, afecta al Campo de Cartagena, que desde el punto de vista topográfico se caracteriza por ser una amplia llanura de escasa pendiente de dirección Noroeste-Sureste. Está bordeada de cadenas montañosas de poca altitud, a modo de barrera, que la limitan con el Mar Mediterráneo. Estas sierras se ven afectadas por una serie de manifestaciones volcánicas que continúan en el mar con las islas del Mar Menor y la isla Grosa. Ya en el Mediterráneo, por el este, un cordón litoral con dirección Sur-Norte cierra un trozo de mar formando el Mar Menor. El Campo de Cartagena está formado por los municipios de Cartagena, La Unión, Fuente Álamo y Torre Pacheco, con una extensión aproximada de 557,5 km².

La vertiente meridional de la Sierra Minera presenta pendientes pronunciadas hacia el mar (superiores al 25% en algunas zonas) (IGME, 1999). Se encuentran multitud de calas, algunas sólo accesibles por mar, como las de Huncos, Mulas, del Cuervo, Gotera y otras que pueden serlo también por tierra, como Cala Reona, Playas de Calblanque, Cala del Cuervo (Atamaría), Bahía de Portman o la Cala del Gorguel.

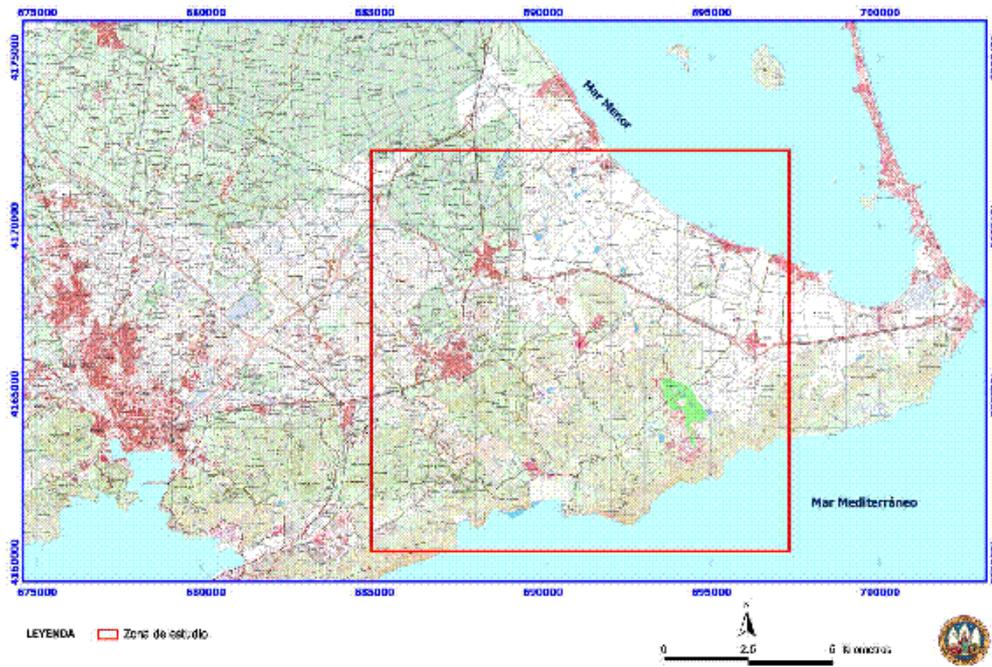


Figura 4.1. Localización de la zona de estudio

4.2. Figuras de protección en la zona de estudio.

En la Sierra de Cartagena-La Unión se han definido varias zonas de interés especial, protegidas por legislación europea, nacional y autonómica. En la zona existe un Parque Regional, Calblanque, Monte de las Cenizas y Peña del Águila, que además está catalogado como Lugar de Importancia Comunitaria (LIC) junto con la Sierra de la Fausilla, estando también incluida en las zonas de especial protección para las aves (ZEPA) (Figura 4.2).

A nivel geológico, en la zona están catalogados varios lugares de interés geológico (LIG), entre ellos el LIG 49 el Carmolí, por su interés petrológico, geomorfológico, tectónico y geoambiental; LIG 51 Mar Menor y La Manga; LIG 52 Calblanque, por su interés geomorfológico y estratigráfico; LIG 50 San Ginés de la Jara, por su interés geológico, geomorfológico y antropológico; LIG 54 Sierra de Cartagena-La Unión, por su especial interés mineralógico y por ser uno de los distritos mineros más importantes de España por sus yacimientos de Fe-Pb-Zn y el LIG 55 Punta Escombreras, de interés geomorfológico y tectónico (Figura 4.2). Dentro del área de influencia de la Sierra de Cartagena-La Unión se

encuentra el Mar Menor, de especial singularidad turística y ecológica, incluida en la Ramsar Convention on Wetlands (Duran et al., 2003).

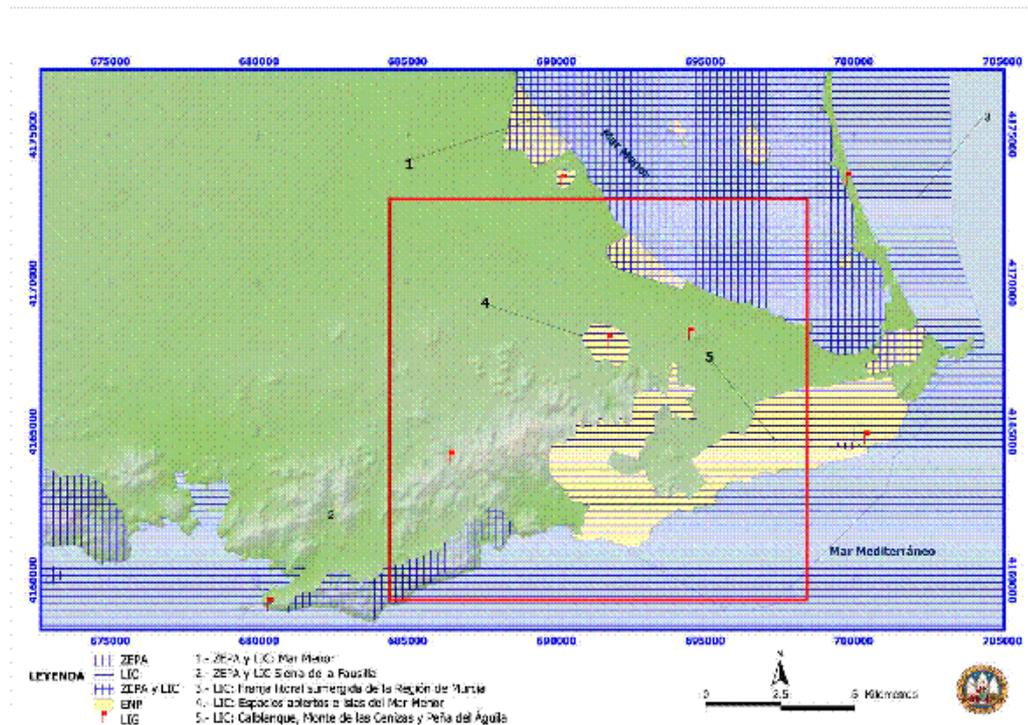


Figura 4.2. Figuras de protección en la zona de estudio

4.3. Aspectos climáticos.

En la zona de estudio se da un clima árido mediterráneo, con unas temperaturas suaves en invierno, que oscilan entre los 10°C y los 12°C, y un verano caluroso con temperaturas entre los 24°C y los 27°C (Conesa García, 1990). La temperatura media ronda los 17°C. Esta termicidad hace raras las heladas y casi imposibles las nevadas. Las precipitaciones son escasas, inferiores a 400 l/m² anuales, y en general, se producen en otoño e invierno, siendo la primavera y el verano las estaciones más secas. Las lluvias suelen tener carácter torrencial.

En las Tablas 4.1 y 4.2 se recogen los datos de temperatura media mensual y anual, y precipitaciones mensuales y totales de los años 2000 a 2006, recogidos en las estaciones meteorológicas de Cartagena Ciudad, Cartagena

H.E., Cartagena Puerto, Pozo Estrecho, Salinas de Cabo de Palos y El Algar. Estos valores han sido suministrados por el Centro Meteorológico Territorial de Murcia y aparecen recogidos en los Anuarios Estadísticos de la Región de Murcia de los años correspondientes (Centro Regional de Estadística 2000-2006).

Durante el periodo 2000-2006, la temperatura media en la zona fue de unos 18,8 °C y las precipitaciones no sobrepasaron los 400 l/m², siendo el año 2003 el más lluvioso.

2000													
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Media
Cartagena HE	10,3	15,2	15,2	16,8	15,2	24,3	26,2	26,4	-	-	-	-	-
Cartagena Puerto	11,4	14,4	15,0	16,3	19,8	23,0	25,0	25,8	23,6	19,7	15,4	14,2	18,6
Cartagena Ciudad	11,0	14,6	15,0	17,0	21,0	-	26,2	-	-	20,4	15,9	14,4	-
El Algar	10,0	14,4	14,8	16,8	20,7	24,1	25,8	27,0	24,2	19,7	14,7	13,6	18,8
Pozo Estrecho	9,4	14,0	14,8	16,6	21,2	24,8	26,7	26,8	24,4	19,4	14,3	12,6	18,8
Salinas Cabo Palos	10,2	13,8	14,8	16,4	20,0	23,2	25,5	26,0	24,4	20,0	15,0	13,0	18,5
2001													
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Media
Cartagena HE	9,8	12,9	17,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cartagena Puerto	14,0	13,0	15,6	15,6	18,0	22,8	24,2	25,2	22,8	20,6	14,1	11,6	18,1
Cartagena Ciudad	14,2	13,8	17,6	17,8	20,4	25,2	26,1	26,9	24,2	21,6	14,8	11,6	19,5
El Algar	13,6	13,0	17,3	18,2	19,6	25,4	26,7	28,5	24,6	21,8	14,6	11,4	19,6
Pozo Estrecho	12,6	12,7	17,3	17,3	20,5	25,6	26,6	27,3	24,4	21,2	13,6	10,6	19,1
Salinas Cabo Palos	12,4	12,4	16,1	16,6	18,9	23,4	25,0	26,2	23,8	20,9	14,4	11,4	18,5
2002													
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Media
Cartagena HE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cartagena Puerto	12,0	12,7	14,0	14,9	17,6	22,1	24,0	24,4	22,8	19,6	16,4	14,2	17,9
Cartagena Ciudad	12,2	13,7	15,9	16,8	19,8	24,4	27,0	27,6	24,2	20,8	17,2	15,6	19,6
El Algar	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pozo Estrecho	11,6	12,7	15,0	16,2	19,8	24,7	26,5	26,5	24,2	20,6	16,5	14,0	19,0
Salinas Cabo Palos	12,2	12,9	14,7	15,6	18,2	22,8	24,8	25,6	23,8	20,1	16,2	13,9	18,4

2003													
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Media
Cartagena HE	14,0	13,2	16,0	17,2	22,1	26,1	28,6	28,6	24,8	20,6	16,7	14,3	20,2
Cartagena Puerto	11,6	11,4	13,4	14,9	18,3	23,8	25,3	26,8	23,2	19,6	15,8	13,8	18,2
Cartagena Ciudad	13,4	13,0	16,0	17,2	22,2	26,0	28,6	28,6	24,8	20,6	16,4	14,0	20,1
El Algar	12,2	11,8	14,0	16,6	20,2	25,8	-	-	24,8	20,6	16,4	12,3	-
Pozo Estrecho	11,0	11,5	14,6	16,6	20,4	25,8	28,4	28,4	24,6	20,0	15,6	12,0	19,1
Salinas Cabo Palos	11,2	11,4	14,4	15,8	19,0	24,4	26,4	27,3	24,0	19,8	15,9	12,8	18,5
2004													
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Media
Cartagena HE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cartagena Puerto	13,8	12,8	13,6	15,0	17,5	23,3	25,2	26,8	25,0	21,7	15,6	13,8	18,7
Cartagena Ciudad	14,4	13,9	-	-	19,3	25,0	26,8	-	26,4	22,9	16,7	-	-
El Algar	14,2	12,4	-	-	18,4	24,4	26,0	27,1	25,2	21,4	15,4	-	-
Pozo Estrecho	13,0	12,1	13,6	15,4	18,8	25,0	26,2	27,8	25,2	21,2	14,6	12,2	18,8
Salinas Cabo Palos	12,6	12,4	13,4	14,9	17,4	-	25,6	27,0	25,2	21,1	15,0	13,0	-
2005													
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Media
Cartagena HE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cartagena Puerto	11,2	10,8	13,1	16,2	20,0	23,6	25,9	25,3	22,8	20,4	15,4	13,2	18,2
Cartagena Ciudad	11,9	11,7	14,5	17,8	21,6	26,0	26,8	26,2	23,6	-	-	13,9	-
El Algar	10,2	10,2	13,5	17,3	20,4	24,4	26,0	-	-	-	14,8	12,6	-
Pozo Estrecho	9,7	9,5	13,4	17,2	21,0	25,0	27,1	25,9	23,1	20,1	14,1	11,5	18,1
Salinas Cabo Palos	10,0	10,1	13,0	16,2	20,0	23,6	26,1	25,5	22,8	20,1	14,6	12,1	17,8

2006													
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Media
Cartagena HE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cartagena Puerto	11,7	12,4	15,1	17,3	19,7	22,3	26,2	25,7	24,1	21,8	17,8	-	-
Cartagena Ciudad	12,4	13,3	17,1	19,0	20,4	22,8	26,5	25,9	24,2	21,6	16,9	12,7	19,4
El Algar	11,6	11,9	15,9	18,2	20,6	22,7	27,0	27,1	24,6	22,1	17,5	13,1	19,4
Pozo Estrecho	10,1	11,6	15,8	18,1	20,8	23,7	27,5	26,6	24,7	21,8	16,9	12,2	19,2
Salinas Cabo Palos	10,8	11,5	15,3	17,3	20,8	22,3	26,6	26,0	24,2	21,9	17,5	13,0	18,9

Tabla 4.1. Temperaturas medias mensuales (°C) en el periodo 2000-2006

2000													
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Cartagena HE	118,0	-	7,7	-	32,5	-	-	-	-	-	-	-	158,2
Cartagena Puerto	97,2	1,3	16,7	-	-	-	-	1,1	-	183,5	-	-	299,8
Cartagena Ciudad	105,8	-	7,2	0,1	28,3	0,2	-	-	-	182,3	18,0	0,5	342,4
El Algar	144,0	-	23,5	-	21,0	-	-	-	-	118,5	52,0	-	359,0
Pozo Estrecho	118,0	-	7,0	-	38,0	-	-	-	5,0	194,0	-	5,0	367,0
Salinas Cabo Palos	120,3	-	4,0	0,6	25,8	-	-	-	4,4	88,1	31,0	0,8	275,0
2001													
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Cartagena HE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cartagena Puerto	7,7	29,5	-	6,4	5,8	-	-	1,3	4,3	22,1	73,0	45,2	195,3
Cartagena Ciudad	8,1	34,1	0,9	10,4	5,1	0,5	-	-	5,1	22,8	80,6	59,0	226,6
El Algar	8,2	47,5	-	4,2	-	-	-	-	27,5	25,0	139,5	91,9	343,4
Pozo Estrecho	6,0	52,0	-	11,5	23,0	-	-	-	23,0	19,0	80,0	72,0	286,5
Salinas Cabo Palos	8,5	38,3	0,5	10,7	5,0	-	0,4	1,0	30,5	10,9	108,6	71,7	296,1

2002													
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Cartagena HE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cartagena Puerto	3,1	1,1	19,8	32,7	48,4	2,1	0,2	8,5	0,4	1,6	22,5	16,5	156,9
Cartagena Ciudad	0,8	-	30,6	38,6	42,6	2,1	1,0	2,2	3,1	1,8	19,0	15,7	157,5
El Algar	4,0	-	51,0	19,0	57,5	2,0	-	90,0	11,8	2,0	19,0	12,5	268,8
Pozo Estrecho	-	-	45,0	46,0	35,0	3,0	-	30,5	13,0	1,5	17,7	18,0	209,7
Salinas Cabo Palos	1,8	0,1	32,8	99,8	57,1	4,6	1,4	9,5	6,0	5,9	20,8	8,7	248,5
2003													
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Cartagena HE	-	-	6,9	-	-	-	-	0,2	5,8	32,8	168,3	-	214,0
Cartagena Puerto	63,0	17,2	7,5	12,1	6,8	0,9	-	0,2	3,2	51,4	121,8	41,6	325,7
Cartagena Ciudad	86,4	31,0	6,9	14,3	18,3	3,8	-	0,2	5,8	32,8	168,3	36,7	404,5
El Algar	128,0	12,2	7,0	25,8	23,0	-	-	-	-	166,0	133,6	24,5	520,1
Pozo Estrecho	91,4	32,5	5,0	17,0	18,0	-	-	-	2,0	125,0	99,0	28,5	418,4
Salinas Cabo Palos	170,4	27,5	4,2	15,7	19,0	0,6	-	-	1,0	89,3	95,2	38,5	461,4
2004													
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Cartagena HE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cartagena Puerto	0,7	6,8	35,2	77,7	17,6	9,9	0,1	-	0,7	0,8	18,0	81,1	248,6
Cartagena Ciudad	-	6,5	-	-	28,2	8,4	-	-	-	1,9	10,2	-	55,2
El Algar	-	-	-	-	34,7	6,5	-	-	-	1,0	16,5	76,7	134,7
Pozo Estrecho	-	14,0	53,9	132,9	30,8	9,4	-	-	-	-	2,6	136,1	379,7
Salinas Cabo Palos	5,3	17,0	112,1	172,2	47,8	6,3	-	-	1,8	2,9	28,2	102,4	496,0

2005													
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Cartagena HE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cartagena Puerto	2,3	54,6	9,4	2,3	2,3	-	-	4,1	15,7	4,8	45,1	4,6	145,2
Cartagena Ciudad	6,3	64,7	14,0	9,8	0,8	0,4	-	4,2	39,7	2,2	63,3	15,4	220,8
El Algar	4,4	48,0	7,3	11,5	-	-	-	19,0	51,0	2,0	76,5	6,5	226,2
Pozo Estrecho	-	48,5	13,7	11,4	-	-	-	47,3	35,0	-	76,0	14,1	246,0
Salinas Cabo Palos	11,4	47,4	16,2	2,5	4,1	-	-	65,9	27,9	1,7	25,4	7,5	210,0
2006													
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Cartagena HE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cartagena Puerto	36,3	6,8	1,1	22,8	14,1	1,9	-	4,2	-	0,1	-	8,7	96,0
Cartagena Ciudad	51,2	9,9	0,9	26,8	20,1	3,0	-	1,6	11,6	0,2	91,0	7,2	223,5
El Algar	66,0	10,5	-	9,0	29,0	-	-	10,0	12,5	-	109,5	51,2	297,7
Pozo Estrecho	59,4	17,3	-	55,0	33,3	-	-	3,3	12,0	-	120,3	4,4	305,0
Salinas Cabo Palos	50,7	20,9	0,4	10,1	39,2	0,2	-	6,8	18,2	-	65,1	19,3	230,9

Tabla 4.2. Precipitaciones mensuales (l/m^2) en el periodo 2000-2006

4.4. Contexto geológico.

La Cordillera Bética constituye la estribación más occidental de la orogenia alpina en Europa. Junto con el Rift forma un cinturón de montañas en forma de arco alrededor del Estrecho de Gibraltar, que se formó durante la convergencia de las placas Africana e Ibérica.

La Sierra Minera de Cartagena-La Unión constituye la estribación más oriental de la Cordillera Bética peninsular, y se encuentra en las zonas internas o Zona Bética ss. El área se caracteriza por su gran complejidad litológica y estructural. Está constituida por la superposición de tres mantos de cabalgamiento complejos, afectados por metamorfismo de grado decreciente de abajo a arriba, tanto dentro de cada complejo como en la serie completa.

En la pila estructural y en orden ascendente se encuentran: el complejo Nevado-Filábride, el complejo Alpujárride y el complejo Maláguide. Posteriormente al emplazamiento de los mantos de cabalgamiento y levantamiento de la cordillera, se produjo una importante fase erosiva y de relleno de las cuencas intramontañosas generadas. A continuación tuvo lugar una fase de distensión y fractura junto con magmatismo. Finalmente, se produjo un nuevo levantamiento (reajuste orogénico), es la fase compresiva que llega hasta la actualidad.

4.4.1. Complejo Nevado-Filábride.

Se subdivide en dos unidades. El Nevado-Filábride inferior constituye la base de la serie, localmente denominado "el muro" y con espesor mínimo de 500 m. Litológicamente está constituido por micaesquistos grafitosos, cuarcitas grises y esquistos cuarcíticos cuya edad puede ser Paleozoica o más antigua. El Nevado-Filábride superior está formado por micaesquistos, cuarcitas, mármoles calcíticos y "rocas verdes" (cuerpos masivos de orto-anfibolitas, que aparecen dispuestos concordantes, y esquistos cloríticos) cuyo espesor nunca llega a superar los 100 m y se ha datado como Permo-Triásico. En los materiales

carbonatados se encuentra la mineralización de sulfuros, con depósito estratoconfinado, explotado a mayor profundidad.

4.4.2. Complejo Alpujárride.

Se dispone discordantemente sobre el complejo Nevado- Filábride superior. Está constituido por tres unidades de espesor variable: Unidad de San Ginés (≈ 250 m), Unidad de Portman (≈ 150 m) y Unidad del Gorguel (≈ 30 m). Todas ellas están formadas por una parte detrítica del Pérmico y una carbonatada, posiblemente del Triásico. En el material carbonatado de la Unidad de San Ginés aparecen cuerpos intrusivos de doleritas y diabasas, que se encuentran como sills y diques. En esta unidad se encuentra el yacimiento estratoconfinado explotado a menor profundidad.

4.4.3. Complejo Maláguide.

Conocido como Unidad los Simones, su afloramiento ocupa un área menor al 1% del área total de la Sierra de Cartagena-La Unión y está constituido por areniscas, cuarcitas, limos y conglomerados y una parte carbonatada constituida por calizas (García-Tortosa et al., 2000).

4.4.4. Serie Neógena.

Durante la fase de plegamiento original se desarrollaron una serie de cuencas restringidas, en las que se produjo sedimentación durante el Neógeno debido a la erosión de los relieves generados y a la transgresión del Mioceno, dando lugar a una serie detrítica depositada de manera discordante sobre los materiales metamórficos, compuesta por rocas pelíticas (argilitas y margas), con intercalaciones de areniscas y niveles de conglomerados (Manteca y Ovejero, 1992). Tras esta fase distensiva tuvo lugar un levantamiento (fase compresiva), lo que permitió que el material depositado durante la transgresión quedara

preservado en grabens y alcanzara un espesor máximo de unos 200 m. Este material también ha sido de interés económico debido a que en él se encontraba mineralización diseminada. El magmatismo Neógeno está representado por rocas subvolcánicas calcoalcalinas (andesitas y dacitas-riolitas) y por rocas extrusivas (basaltos).

La zona de influencia de la Sierra Minera, el Campo de Cartagena, ocupa una depresión con un potente relleno neógeno margoso de más de 1000 m de potencia, que presenta intercalaciones de conglomerados (hasta 300 m en el Tortoniense), calizas (hasta 200 m en el Andaluciense) y areniscas (hasta 50 m en el Plioceno).

4.4.5. Cuaternario.

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

4.5. Hidrología.

La zona estudiada carece de cursos permanentes de agua y se caracteriza por la existencia de corrientes de aguas superficiales (ramblas) de régimen no continuo o intermitente, con cauce ancho y plano, que únicamente disponen de caudal en la época de lluvias, a consecuencia del régimen climático mediterráneo (Figura 4.3).

En la Tabla 4.3 se muestran las ramblas que atraviesan la Sierra y algunos parámetros significativos de las mismas (García García, 2004).

Rambra	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		11,96	16,66	6,46	384	3,08
Beal		7,6	17,35	7,22	242	1,92
Matildes		17,38	26,15	6,73	379	3,22
Miedo		36,87	30,56	7,78	386	2,84
Portman	Mar Mediterráneo	10,77	16,09	2,28	302	7,54
Gorguel		3,4	10,4	4,0	322	4,61
Escombreras		26,77	26,47	6,72	221	1,63
Santa Lucía		5,05	10,1	2,92	210	4,12
El Hondón		19,55	23,99	7,48	198	1,52

Tabla 4.3. Características de las Ramblas de la Sierra de Cartagena-La Unión. (García García, 2004).

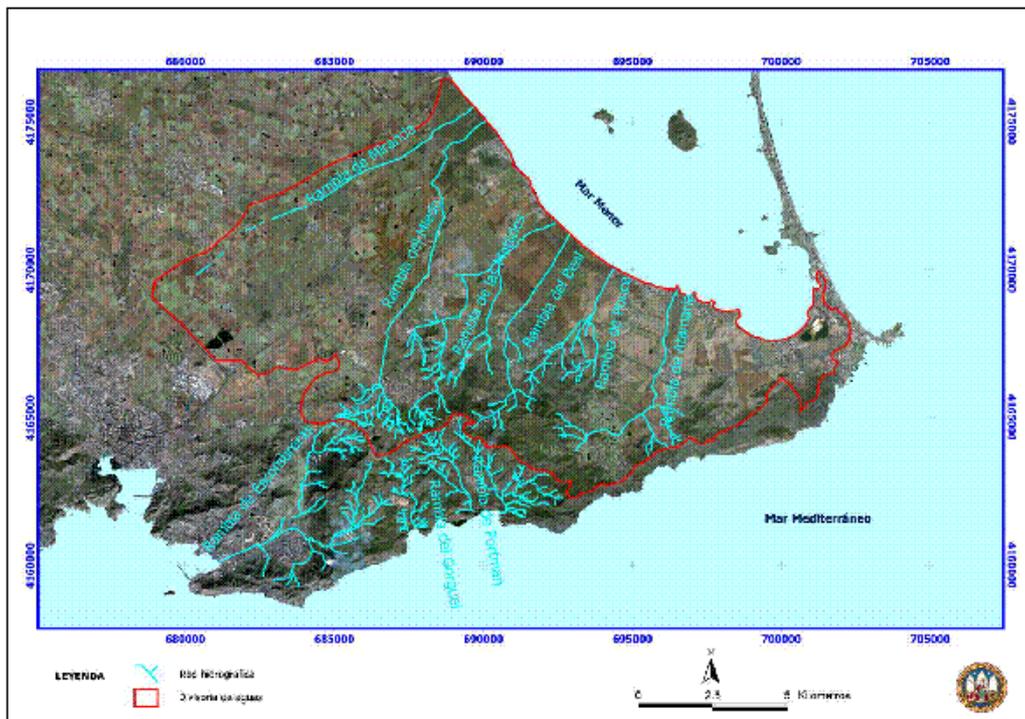


Figura 4.3. Ramblas de la zona de estudio.

4.6. Mineralogía.

La zona presenta elevado interés por la variedad de especies mineralógicas presentes, por los procesos mineralogénicos que las han originado y por los procesos de alteración pasados y actuales que actúan sobre estos materiales.

Entre ellos, el Cabezo Rajao es un ejemplo de yacimiento mineralo-metálico de PBG (pirita-blenda-galena) asociado a una intrusión de roca volcánica de basicidad intermedia asociado a una alteración hidrotermal que depositó las menas metálicas (sulfuros), transformando la mineralogía original de la roca, resultando una paragénesis compleja, que es representativa de estos procesos.

La Figura 4.4 resume los procesos mineralogénicos más representativos de este emplazamiento.

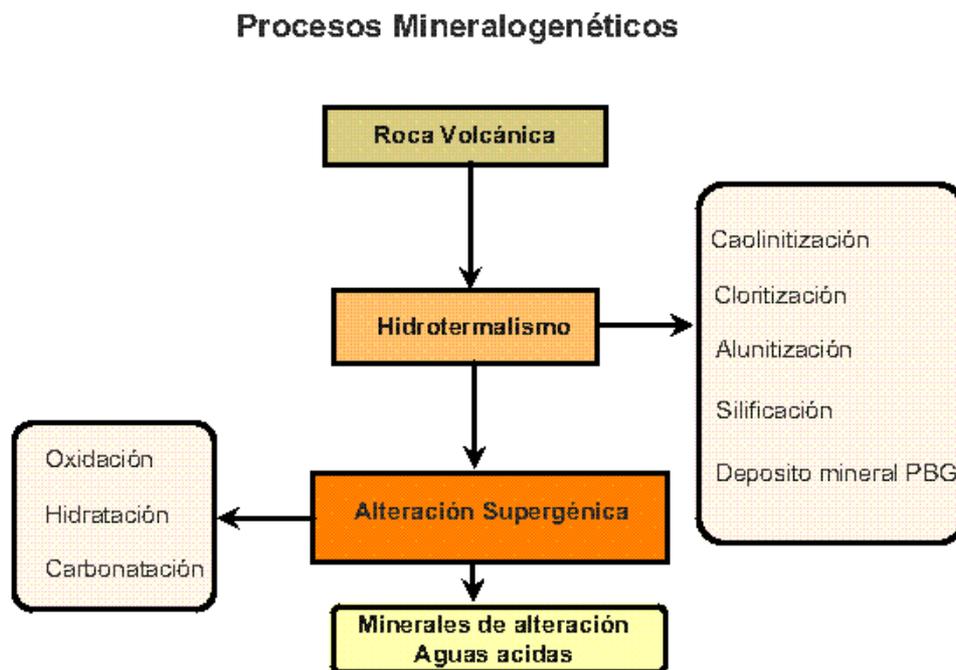


Figura 4.4. Procesos mineralogénicos de la zona

Sobre los materiales actúan los agentes de meteorización, dando lugar a todos los procesos de alteración supergénica, con formaciones de monteras o gossan.

Actúan principalmente sobre materiales de textura fina y en la superficie y grietas de los gruesos, formando minerales nuevos con un grado de hidratación mayor que los que se destruyen. Esto provoca un incremento de estos procesos supergénicos acelerándolos, puesto que conducen a un aumento de volumen de las fases presentes, lo que se traduce en un aumento del esfuerzo de la roca coherente y facilita su fragmentación. La aparición de costras, eflorescencias, pátinas, etc., son signos evidentes de la importancia del proceso.

Otro aspecto de gran importancia es que la alteración por oxidación de los sulfuros conduce a la presencia de ácido sulfúrico, lo que provoca un pH muy bajo (aguas de lixiviación con pH próximo a 2) que pueden transportar en disolución una elevada concentración de elementos traza.

La cristalización de estas aguas por evaporación en zonas deprimidas, da lugar a un número muy elevado de sulfatos polihidratados de metales trivalentes, como hierro en forma férrica y aluminio, y de metales divalentes como magnesio, hierro en forma ferrosa y cinc, solubles en agua y que llevan incorporados diferentes metales en proporciones diversas.

Los alumbres, sulfatos trivalentes, de aluminio y hierro en forma férrica, y monovalentes de sodio y potasio son muy abundantes y están asociados a los mismos procesos. Si se trata de hidroxisulfatos (alunita y jarosita), su origen se encuentra más relacionado con la alteración primaria de la roca volcánica por medio de procesos hidrotermales que por este proceso de superficie, aunque no podemos descartar que para la jarosita, sea éste último el más importante.

En la Tabla 4.4, resumen de la mineralogía de las muestras estudiadas, se puede observar en los minerales identificados, la correspondencia que existe con los procesos primarios y secundarios que se han dado en este lugar.

Mineral	Roca volcánica	Roca Alterada	Materiales de escombreras
Silicatos	Cuarzo Cristobalita Plagioclasa Sanidina Clorita Caolinita Mica Piroxenos Anfíboles	Cuarzo Sanidina Clorita Caolinita Mica Piroxenos Anfíboles	Cuarzo Cristobalita Plagioclasa Sanidina Filosilicatos
Sulfuros			Blenda Galena Pirita Marcasita
Óxidos y Oxihidroxidos		Hematites Goethita Ferrihidrita	Hematites Goethita Ferrihidrita
Carbonatos	Calcita	Calcita	Cerusita Smithsonita Azurita Malaquita
Sulfatos Insolubles		Grupo de la Jarosita Grupo de la Alunita Yeso	Grupo de la Jarosita Grupo de la Alunita Yeso Anglesita
Sulfatos Solubles			Grupo de la Copiapita Halotrichita Blanchita Melanterita Goslarita Epsomita Hexahidrita Ferrohexahidrita

Tabla 4.4. Cuadro resumen de la mineralogía predominante en la zona

4.7. Contexto edafológico.

El mapa de suelos se realizó basándose en la cartografía de la que dispone la Región de Murcia a escala 1: 100000, según la Leyenda del Mapa de Suelos de FAO-UNESCO (1974), realizada en la Universidad de Murcia por el equipo dirigido por el Prof. Dr. Luis Alías Pérez, en el marco del Proyecto LUCDEME, y de cuyas memorias hay 20 publicadas en papel (Martínez-Sánchez et al., 2007) y el resto en versión digital, incluidas en el Mapa Digital de Suelos de la Región de Murcia, editado por la CARM (Mapa de Suelos de la Región de Murcia, 1999). En ellas aparecen delimitadas unidades cartográficas que corresponden, en ocasiones, a una sola unidad taxonómica. Sin embargo, en general, presentan asociación de dos o más suelos, en cuyo caso, las unidades que se encuentran en más del 20% de la superficie correspondiente dan nombre a la asociación, mientras que las de menor extensión relativa, pero siempre mayor del 5%, se encuentran como inclusiones.

4.7.1. Campo de Cartagena.

Los suelos predominantes en el Campo de Cartagena son los siguientes:

4.7.1.1. Xerosoles.

Los Xerosoles son suelos con régimen de humedad arídico, con un horizonte superior claro, a ócrico, con poca materia orgánica, y uno o más de los horizontes diagnósticos: cámbico, argílico, cálcico o gípsico.

Como en la clasificación FAO-UNESCO (1988) no se tiene en cuenta el régimen de humedad, se corresponden, cuando tienen horizonte cálcico, con Calcisoles.

Su perfil es de tipo A- Ck, A- Ckm, y A- Bt- Ck. Pueden estar desarrollados sobre materiales del Plioceno, principalmente conglomerados, areniscas y areniscas rojas o sobre materiales cuaternarios, mantos de arroyada difusa y

abanicos aluviales, conglomerados, arenas y arcillas, que ocupan superficies de glaciares y laderas de suave pendiente.

Según la naturaleza del horizonte de acumulación de carbonato cálcico, los Xerosoles se denominan cálcicos o petrocálcicos. El horizonte cálcico a veces está fuertemente cementado, formando una costra caliza, petrocálcicos en este caso. A veces están tan mezclados que resulta difícil separar cálcicos y petrocálcicos.

En la zona de influencia de la Sierra Minera, en el Campo de Cartagena, predominan los Xerosoles cálcicos. En gran parte se presentan en asociación con Xerosoles petrocálcicos o con Xerosoles lúvicos; en ocasiones, tanto unos como otros son inclusiones. Son numerosas las zonas en las que estas unidades aparecen en fase salina, como se observa en la Figura 4.5.

Los Xerosoles lúvicos aparecen como unidad independiente en algunos puntos. En estas zonas es frecuente la existencia de Luvisoles cálcicos, tanto asociados como en inclusión.

En zonas de glaciares en la proximidad de las sierras calizas más importantes se asocian o incluyen con Fluvisoles (aunque no están cartografiados como unidades independientes ni como asociaciones y/o inclusiones), donde las aguas superficiales han desarrollado todo un sistema de barrancos y ramblas después de las descargas de materiales.

4.7.1.2. Litosoles.

Son los suelos que se estima ocupan el segundo lugar en abundancia en la zona de estudio. Aparecen en zonas montañosas, generalmente con fuertes pendientes y escasa vegetación. Son suelos jóvenes en los que la erosión, a veces, es muy intensa y en los que suele aflorar la roca madre. Su profundidad está limitada por roca dura, coherente y continua a menos de 10 cm de la superficie. Poseen un perfil tipo A- R, donde el horizonte A siempre es ócrico, pues aunque cumpla, en ocasiones, los requisitos del mólico en cuanto a contenido en materia orgánica, color, estructura, etc., su espesor no alcanza los 10 cm.

El tipo de roca sobre el que se desarrollan es muy variada, como calizas, dolomías, conglomerados, areniscas y rocas volcánicas básicas, esquistos, pizarras, cuarcitas, etc.

Suelen ir acompañados de otros tipos de suelos ya sea como asociación o como inclusión en Rendsinas y Xerosoles. Corresponden a Leptosoles en la FAO-UNESCO (1988).

4.7.1.3. Luvisoles.

Son suelos, que aunque no forman una unidad cartográfica independiente en el Campo de Cartagena, dado que se forman en un régimen de humedad más húmedo que el actual, su existencia es importante porque indica una climatología de formación diferente, tratándose de paleosuelos. Presentan un horizonte A ócrico y un horizonte B argílico con grado de saturación mayor del 50%, al menos en su parte inferior. Con frecuencia existe debajo de éste un horizonte cálcico, por lo que se trata de Luvisoles cálcicos.

4.7.2. Sierra Minera Cartagena-La Unión.

Los suelos de la Sierra Minera, han sufrido una fuerte acción antrópica debido a las labores mineras que en ellos se han llevado a cabo. Aún así, existen suelos naturales muy interesantes en el Cabezo Rajao o el Monte Agudo, conformando uno de los escasos enclaves de suelos desarrollados sobre rocas volcánicas, poco abundantes, y que forman parte del último vulcanismo del sureste español (Figura 4.5).

4.7.2.1. Suelos naturales.

En zonas de cumbre y ladera de fuerte pendiente sobre roca volcánica, los suelos están poco desarrollados y evolucionados debido a los fenómenos de erosión. En este caso se desarrollan Litosoles y Xerosoles. Cuando el microclima

es más húmedo, en zonas de umbría, y en las que existe un mayor desarrollo de la cubierta vegetal, los suelos sobre rocas volcánicas tienen un mayor contenido en materia orgánica, horizonte móllico, y se clasifican como Rendzinas, estando como inclusiones con Litosoles en la zona minera.

En zonas con orientación norte y pendiente suave, estabilizadas con vegetación natural y sobre materiales coluviales diversos (rocas volcánicas mezcladas con materiales calizos), el agua permanece más tiempo en el suelo y los procesos de alteración cobran importancia, desarrollándose Phaeozems (suelos con horizonte A móllico que carecen de horizonte cálcico o gípsico y de caliza blanda pulverulenta dentro de 125 cm de la superficie y de las características diagnósticas propias de otras unidades taxonómicas). Algunos pueden ser calcáreos entre los 20 y 50 cm y se denominan Phaeozems calcáricos. Los Phaeozems aparecen en inclusión con Litosoles en la Sierra Minera (Figura 4.5).

Ocasionalmente (Cabezo Rajao) se desarrollan Cambisoles calcáricos, que presentan un horizonte de alteración *in situ* Bw cámbico, y son calcáreos entre 20 y 50 cm de profundidad, y que al igual que los anteriores son escasos y de gran interés.

Además de éstos, en zonas con orientación norte existen también Xerosoles cálcicos o petrocálcicos.

En zonas con orientación sur y escasa pendiente junto con zonas de piedemonte, los suelos son Xerosoles, ya que en estas zonas la vegetación es escasa y por tanto el contenido en materia orgánica también lo es, existiendo procesos de lavado y precipitación de carbonato cálcico a poca profundidad en el perfil.

En zonas de piedemonte y llanura, además de los anteriores, aparecen Fluvisoles, formados a partir de sedimentos fluviales que, en este caso, corresponden a los depósitos de ramblas y ramblizos. Sus características son muy variables, dependen del material original que haya sido arrastrado, y que aquí tiene unos altos contenidos en materiales procedentes de escombreras, mezclados con estériles de mina, productos de alteración de las rocas volcánicas, materiales calizos, margosos, etc., siendo su textura, pH, contenido en carbonatos y sales muy variable. Pueden ser Fluvisoles calcáricos y Fluvisoles sálicos (Navarro Hervás, 2004)

4.7.2.2. Suelos antrópicos.

Las actividades humanas han provocado en la zona modificaciones profundas en los horizontes originales del suelo, o los han enterrado, debido a la eliminación o perturbación de los horizontes de superficie, apertura de tajos, rellenos, etc., denominándose los suelos resultantes, según la clasificación de FAO-1988, Antrosoles (FAO-1988).

En la zona de estudio se trata de Antrosoles úrbicos ya que presentan una profundidad de más de 50 cm de acumulación de residuos procedentes de minas. Son suelos representados ampliamente en la Sierra Minera y que presentan un contenido en gravas y cantos heterométricos muy variable. Algunos Antrosoles úrbicos están formados en zonas de ladera de fuerte pendiente, con un material arcillo-limoso, pulverulento, de pH muy ácido (1-3), con muy alto contenido en elementos traza, que han sido y están siendo sometidos a una fuerte erosión hídrica. También la erosión eólica adquiere importancia, puesto que se trata de materiales de textura muy fina, sin compactación, muy sueltos y cuya dispersión puede alcanzar varios kilómetros de distancia.

Los Antrosoles úrbicos formados sobre materiales de textura más gruesa, no presentan el mismo comportamiento, ya que, aunque en ocasiones tienen un pH ácido y alto contenido en elementos traza, los fenómenos de erosión y dispersión hídrica y eólica de materiales particulados finos son menos importantes por la existencia de gravas y piedras en superficie. Sin embargo existe el riesgo de lixiviados ácidos.

Es de destacar que algunos Antrosoles formados sobre escombreras antiguas, en laderas estabilizadas, donde se ha desarrollado una vegetación de gramíneas o plantas de alta densidad de enraizamiento, han evolucionado pasando a ser Cambisoles (Cabezo Rajao).

Otros Antrosoles úrbicos se desarrollan en las zonas donde se encuentran balsas de estériles. Algunas están estabilizadas desde hace algunas décadas por recubrimiento con capas de material carbonatado de bastante espesor y con vegetación; en estos casos, los horizontes superficiales presentan bajo contenido en elementos traza, aumentando éstos con la profundidad; aquí no se presenta riesgo de dispersión de partículas, aunque sí puede existir riesgo de lixiviados.

Sin embargo, en las balsas en las que recientemente se ha llevado a cabo una actuación y que han sido en parte vaciadas, recubiertas por una capa muy fina de material carbonatado y que no presentan vegetación, los suelos desarrollados presentan un elevado contenido en elementos traza, así como en material fino, existiendo un alto riesgo de dispersión por erosión eólica e hídrica, similar a las zonas de balsas que no han sido tratadas (Navarro Hervás, 2004).

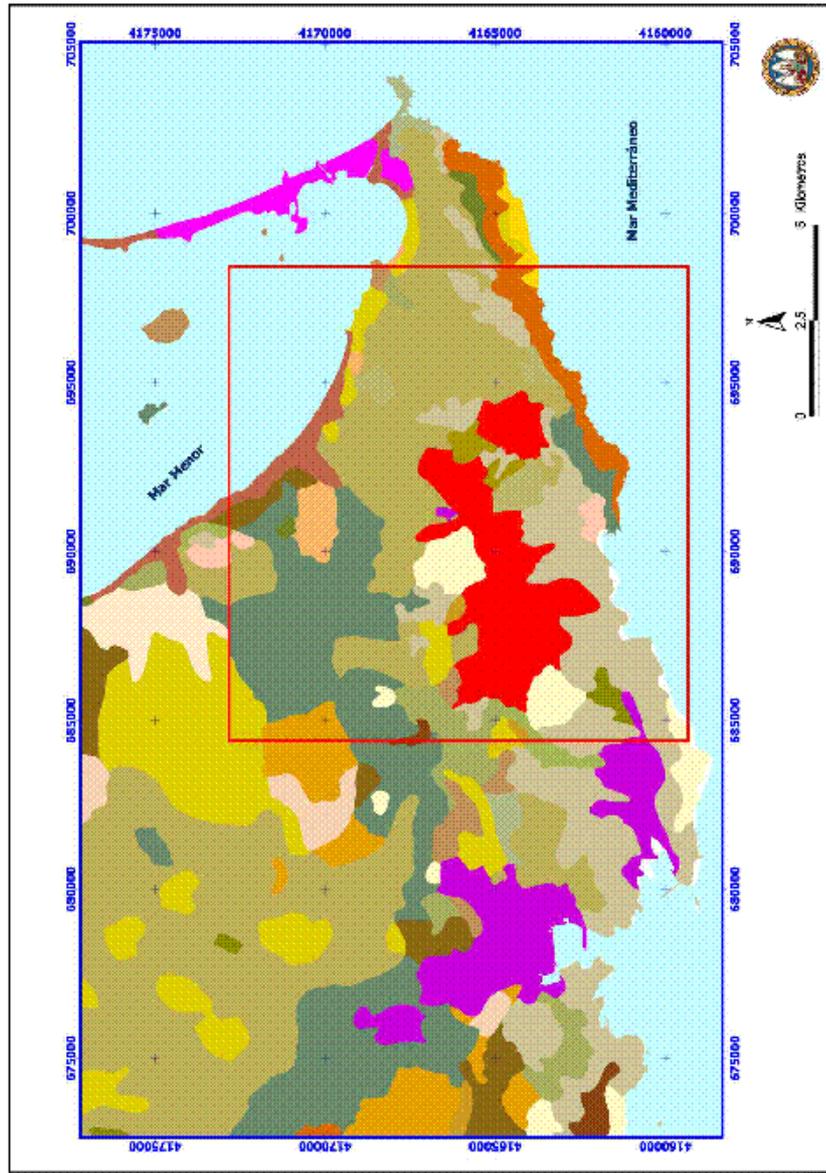


Figura 4.5. Mapa de suelos de la zona

4.8. Vegetación y actividades agrícolas.

4.8.1. Marco biogeográfico.

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. Los límites de esta provincia son, al Norte: Provincias Catalana-Valenciano-Provenzal y al Oeste: provincia Bética (Alcaraz Ariza, 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 iberoafricanismos (Alcaraz Ariza, 1999).

4.8.2. 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 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 Ariza et al., 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 (*Chamaerops 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 la sabina mora (*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-Tetradineto articulatae* S. (Alcaraz Ariza et al., 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 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 climácica que se corresponde con esta serie es un matorral impenetrable de lentisco (*Pistacia lentiscus*), al que acompañan espinos negro, acebuche y esparraguera.

4.8.2.1. 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 la disponibilidad de agua.

La vegetación está compuesta por un matorral espinoso (cornical, arto, palmito, esparragueras, espinos negro) en el que pueden aparecer acebuches y algarrobos. Dicho matorral sólo es reconocible en unos pocos sectores de la cuenca debido a la degradación sufrida por la intensa actividad antrópica en la zona de estudio.

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 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 (Figura 4.6).

Lapiedro martinezii-stipetum tenacissimae: la constituyen espartizales termo y mesomediterráneos inferiores seco-semiáridos ibérico-meridionales, que se asientan sobre suelos de distinta naturaleza y de profundidad media. Está dominada por *Stipa tenacissima*, 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 de la zona de estudio.

Se encuentran 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 squamigerarum: 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 la zona de estudio, la existencia de esta asociación queda patente por la presencia de *Phagnalon saxatile*.

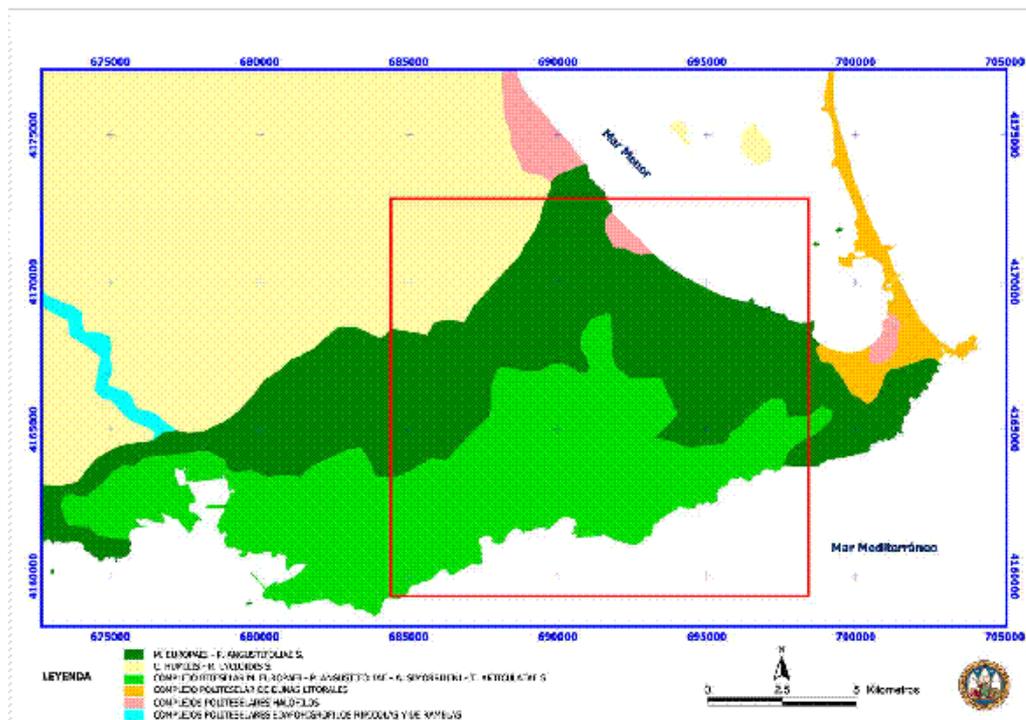


Figura 4.6. Mapa de vegetación potencial

4.8.3. Vegetación actual y actividades agrícolas.

Es el resultado de la interacción entre el hombre y la naturaleza, cuyo estudio se hace observando y cartografiando directamente en el terreno. La vegetación existente no es de porte arbóreo, esencialmente se trata de matorral mediterráneo.

La vegetación se ha visto afectada por las actividades mineras, no sólo por la desaparición de su sustrato, sino también por el intenso aprovechamiento que ha sufrido por su utilización como leña para los hornos mineros desde la época romana.

Pequeñas áreas de la zona han sido reforestadas con *Pinus halepensis* (Figura 4.7) aunque la vegetación predominante es el matorral.

En el área de estudio existen explotaciones agrícolas marginales, ya que la escasez de agua constituye un recurso limitante a la hora de planificar una explotación agraria. En algunos casos esta marginalidad se acentúa por la escasa calidad del suelo. Las explotaciones existentes se encuentran distribuidas por toda la zona montañosa litoral, en pequeños valles, vaguadas o laderas,

caracterizadas por cultivos de secano, tanto de cereal (principalmente cebada), como cultivos leñosos (algarrobos, olivos, almendros, higueras). Suelen tener una rentabilidad económica muy limitada, siendo de gran interés ambiental para la conservación de diferentes comunidades animales y el control de los factores potenciales de desertificación (Fundación Sierra Minera 2001).

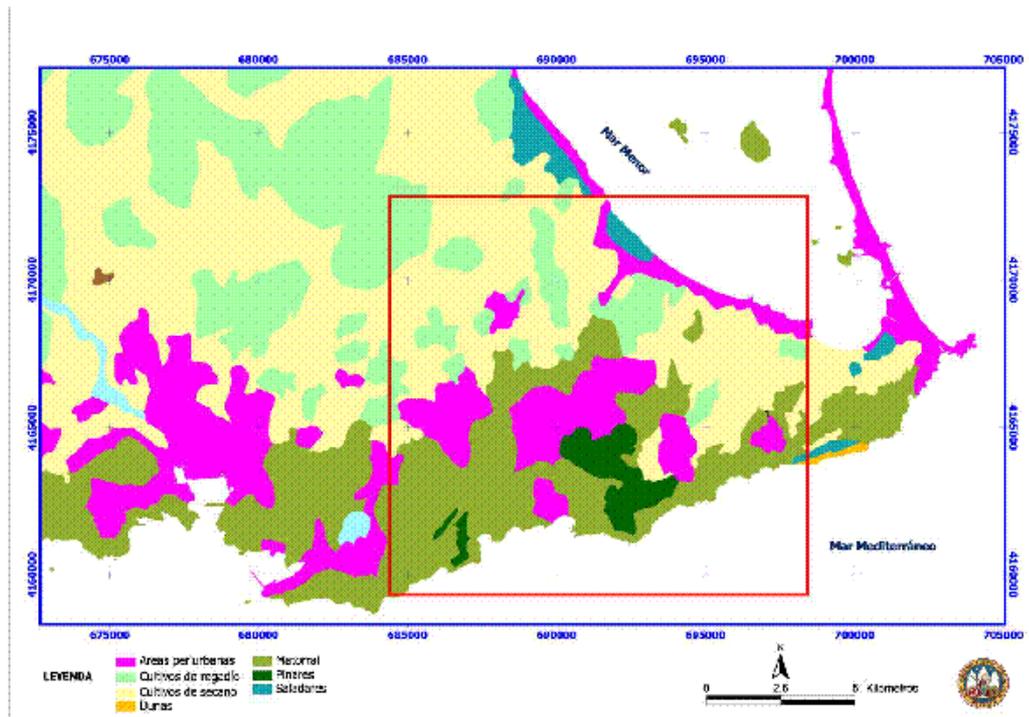


Figura 4.7. Mapa de vegetación actual

4.9. La minería en la Sierra de Cartagena- La Unión.

4.9.1. Explotación minera en la zona.

La Sierra Minera de Cartagena-La Unión estuvo sometida a una intensa actividad minera desde tiempos pretéritos. La historia de cada emplazamiento es compleja, con varios ciclos de explotación a través de casi tres mil años, por lo que las escombreras que quedan son un registro de todas las actividades que han afectado a cada uno de ellos (Figuras 4.8 y 4.9) (Martínez-Sánchez et al., 2008b; Navarro Hervás, 2004).

Las actividades extractivas se remontan muchos siglos atrás, ya que se han encontrado vestigios de explotaciones pertenecientes a civilizaciones antiguas, como iberos, fenicios, cartagineses y romanos, quienes extrajeron principalmente oro, plata, plomo, cinc, hierro y cobre (Oen et al., 1975, Orejas y Antolinos, 2001). Los cartagineses además de plata extrajeron grandes cantidades de metales.

En la época púnica, las minas de plata de La Unión constituyeron junto con el esparto de la comarca cartagenera, el principal sustento de la guerra contra Roma. Las monedas con las que se pagaba a los mercenarios púnicos se acuñaban con la plata de sus minas. En esta época se llegó a extraer una cantidad superior a 300 libras de plata diarias. El poblado donde habitaban trabajadores y esclavos de estas minas fue el inicio de La Unión.

Hasta la llegada de los romanos, las técnicas de explotación eran muy rudimentarias, pero su tecnología les permitió construir galerías de hasta 500 m de profundidad. Los principales asentamientos de época romana están relacionados directamente con explotaciones mineras o con pequeños hornos de tratamiento de menas, lo que indica que poseían un conocimiento preciso de los principales yacimientos y de los niveles en los que se encontraban las mayores leyes, a juzgar por el elevado número de labores romanas de interior. También la metalurgia que emplearon era realmente eficaz, como revela el estudio de varias escorias de fundición del paraje de Las Herrerías (Arana y Pérez-Sirvent, 1981).



Figura 4.8. Explotación minera abandonada

A finales del siglo XIX se activan las labores mineras que permanecieron hasta los años noventa, cuando la crisis del sector siderometalúrgico determina el fin de la actividad. En esta última fase se pueden distinguir dos etapas: en primer lugar, una etapa de desarrollo y agotamiento del proceso, entre los años 1842 y 1950, que a su vez supuso un importante impacto demográfico en la zona y el desarrollo de infraestructuras como redes viarias, ferrocarril y el acondicionamiento de los fondeaderos de Cartagena, Escombreras y Portman (Navarro Hervás, 2004). En la segunda etapa, de recuperación, que tuvo lugar entre los años 50 y 90, se desarrollaron nuevas bases tecnológicas y se obtuvieron, hasta 1991, minerales de plomo, plata, cinc y otros contenidos de las piritas, que supusieron una aportación a la producción nacional del 40% de plomo, el 60% de plata, el 12% de cinc y 130000 t/año de piritas (Dirección General del Medio Natural, Región de Murcia, 1998). La explotación minera en esta fase supuso la movilización de grandes cantidades de suelo, lo cual ha provocado un cambio estructural, originándose enormes huecos y escombreras y la creación de balsas artificiales, lo que ha supuesto la alteración del relieve natural y del paisaje de la zona.

En la actualidad pueden diferenciarse instalaciones características de las construcciones mineras como castilletes, pozos, chimeneas o lavaderos.



Figura 4.9. Explotaciones abandonadas en la Sierra Minera

De la importancia de los yacimientos minerales del distrito minero de Cartagena-La Unión existen estimaciones orientativas (Manteca y Ovejero, 1992), basadas en criterios geológicos y apoyadas en la abundante información minera, en los datos estadísticos de producciones, etc. (Tabla 4.5). Según estas estimaciones, la cuantía original de estos depósitos minerales superaría los 240 Mt de mineral bruto, con un contenido en metales del orden de 64 Mt de hierro, 3,2 Mt de plomo, 3,8 Mt de cinc y 4000 t de plata, cifras que los destacan netamente de otros distritos mineros.

Yacimientos de la Sierra de Cartagena	Tonelaje mineral (kt)	Metal contenido (kt)			
		Fe	Pb	Zn	Ag
Mineral explotado en época reciente (1940-1990)	90000	26176	1244	1673	1,54
Mineral residual existente (gossan incluido)	80000	26080	1202	1328	1,48
Mineral original probable (gossan incluido)	240000	64574	3204	3811	4,09

Tabla 4.5: Acumulación de metales en el distrito minero de La Unión: ensayo de cuantificación (Manteca y Ovejero, 1992)

A nivel de contenido metálico relativo se le puede considerar como un distrito pobre, casi marginal, con las excepciones muy localizadas de ciertos enclaves o filones, como el caso del Cabezo Rajao. Ello explica el carácter cíclico

y discontinuo de la actividad minera en la zona. Las mayores minas de la zona de estudio, en cuanto a su tonelaje de mineral, pueden observarse en la Tabla 4.6.

Principales minas de la Sierra de Cartagena	Tonelaje de mineral extraído durante el periodo 1957-1990
San Valentín	18000000
Emilia	11300000
Tomasa	9000000
Los Blancos III	7000000 (+ 11000000 por extraer)
Los Blancos I y II	5600000
Gloria	3700000
Brunita	3000000
San José- Gloria Este	1300000

Tabla 4.6. Principales minas de la Sierra de Cartagena

La naturaleza de los materiales presentes en los emplazamientos mineros, granulometría, composición y mineralogía son consecuencia de las circunstancias que han acompañado al emplazamiento y condicionan los procesos de alteración que provocan los agentes climáticos (Martínez-Sánchez et al., 2007).

Las explotaciones mineras modernas suelen ser a cielo abierto y las escombreras están constituidas por los desmontes, presentando baja reactividad frente a los agentes de meteorización. Por el contrario, si las explotaciones son antiguas, con minería subterránea además de actividades metalúrgicas, las escombreras son heterogéneas, con alto contenido en elementos traza, alto grado de alteración y elevada reactividad (Navarro Hervás, 2004).

4.9.2. Tipología de los yacimientos.

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

1. Mantos.
2. Diseminaciones en el mioceno.
3. Enjambres de vetillas (stockworks) y filones asociados a las vulcanitas.
4. Estructuras filonianas y reticulaciones en el paleozoico.

4.9.2.1. Mantos.

Se refiere a un término minero local, empleado para referirse a las mineralizaciones estratiformes que han constituido el principal recurso mineral de la Sierra Minera y en los que se han desarrollado, desde el año 1957, las explotaciones a cielo abierto. Según su posición estratigráfica se distinguen: 1^{er} y 2^o manto.

- **1^{er} manto o manto superior:** Se encuentra en el complejo Alpujárride inferior asociado a las doleritas. Se ha encontrado en la zona minera central (cortas Emilia, San Valentín y Tomasa), extendiéndose unos 10 km². También aparece en la zona este (Buen Consejo-Julio César) y en alguna pequeña área aislada. Su geometría es irregular, siendo su límite inferior, en general concordante y coincidiendo con las filitas basales, mientras que sus límites superior y laterales son irregulares y discordantes con 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.
- **2^o 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 y centrada sobre la zona del Sancti Spiritu (corta San Valentín). Su geometría es estratiforme y concordante con las rocas encajantes y con sus estructuras de esquistosidad y plegamiento. Sin embargo, se muestra discordante en el contacto lateral con los mármoles, controlado por fracturas y superficies de discontinuidad (Manteca y Ovejero, 1992).

4.9.2.2. Disseminaciones en el Mioceno.

Constituyen el recurso minero de mayor importancia y están localizados en una estructura de graben al sur del Llano del Beal, dentro de la que forman

cuerpos irregulares alargados en la dirección NW-SE, según la fractura. La mineralización aparece diseminada en las diferentes litologías, existiendo una concentración preferencial al aumentar el tamaño de partícula del sedimento. Los sulfuros se presentan finamente diseminados en los niveles pelítico-arenosos, y en texturas más gruesas en los niveles conglomeráticos, siendo característico en éstos últimos el reemplazamiento de clastos calizos por sulfuros, que adoptan el aspecto de falsos cantos (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.

4.9.2.3. Enjambres de vetillas (Stockworks) y filones asociados a vulcanitas

En las zonas de La Parreta, Cabezo Rajao y La Crisoleja se encuentran 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.

Se localizan también mineralizaciones tipo stockwork o enjambres de vetillas, tanto en las vulcanitas como en las rocas encajantes. En la zona de la Crisoleja se ha desarrollado un yacimiento en vetillas, en relación con un domo subvolcánico, con una paragénesis particular, compuesta por minerales de hierro, plomo, plata y estaño (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.

4.9.2.4. Cuerpos filonianos y reticulaciones en el paleozoico.

Cuerpos filonianos

A lo largo de toda la Sierra Minera, pero sobre todo en la zona central, existe un campo filoniano desarrollado a favor del sistema de fractura 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, se estructuran dentro de contornos irregulares alargados según la fractura 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.

4.9.3. Métodos de explotación.

4.9.3.1. 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 pero de modo más general de forma desordenada.

4.9.3.2. Minería a cielo abierto.

El laboreo superficial se ha practicado en la Sierra Minera para la explotación de masas de carbonatos. En el inicio de la actividad, la explotación se llevó a cabo de una manera desordenada, con elevada contaminación por polvo de mineral y gases de las fundiciones.

Una modernización posterior dio lugar a las denominadas cortas, en las que el laboreo se llevó a cabo en bancos descendentes. La explotación minera por este método comenzó 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 (García García, 2004).

4.9.4. Procesos mineralúrgicos. Procesos de concentración.

4.9.4.1. Concentración por gravimetría.

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 y la ganga. El proceso de concentración gravimétrica comenzaba con el vertido del mineral extraído en la tolva de entrada, para iniciar la molienda hasta un tamaño adecuado. De aquí, el mineral molido pasaba a la sección de cribado, donde el mineral mezclado con el agua se agitaba y por diferencia de densidades, la ganga se situaba arriba y la mena se depositaba en el fondo. Los minerales más finos pasaban a los rumbos, que consistían en unas balsas circulares, 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. 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.

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.

4.9.4.2. Concentración por flotación diferencial.

La flotación es un proceso de separación y concentración de minerales que permite el tratamiento de minerales cuyas bajas leyes no permite su concentración por otro procedimiento económicamente rentable.

En la Sierra de Cartagena-La Unión, el primer lavadero de flotación fue El Concilio, situado en la zona del Gorguel. 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 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, con unas leyes medias de 1,5-2% Pb, 2-3% Zn (García García, 2004). Cesó su actividad en 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 en febrero de 1991.

La flotación por espumas se basa en las diferentes propiedades físico-químicas de la superficie de las partículas minerales. Así, respecto al agua la ganga es hidrófila, en tanto que las menas son hidrófobas. Respecto al aceite sucede al revés, la ganga actúa como hidrófoba y las menas como hidrófilas. Si la mena más la ganga triturada a un tamaño inferior a 500 μm 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.

4.9.5. Impactos producidos por la actividad minera en la zona.

En la principal zona minera, que aproximadamente ocupa 50 km^2 y se localiza en la parte central de la Sierra de Cartagena-La Unión, el suelo natural ha sido eliminado por las excavaciones mineras, por las acumulaciones de residuos y estériles y por la construcción de naves industriales, carreteras, pistas, etc.

El impacto más evidente sobre el medio hídrico es la aparición de lagos en el interior de las cortas mineras, así como la existencia de surgencias de drenaje ácido.

Además, las actividades mineras subterráneas condicionan la dirección principal de flujo del agua subterránea, mientras que la excavación de cortas y pozos favorece la recarga del acuífero.

La excavación de las cortas mineras ha modificado la divisoria de aguas de las cuencas vertientes de las distintas ramblas al localizarse principalmente en las cabeceras.

Las numerosas acumulaciones de residuos mineros presentes en el área de estudio han contribuido a la transformación de la orografía del terreno (Figura 4.10). La erosión de estas acumulaciones ha dado origen a la movilización de importantes cantidades de material así como la entrada de elementos tóxicos, presentes en la mineralización, en los ecosistemas del área de estudio y en su área de influencia.



Figura 4.10. Zona minera del Gorguel

Existen residuos mineros en las ramblas, debido al vertido directo en inicio y posteriormente debido a la escorrentía superficial (Figura 4.11) y al transporte eólico.

Es importante considerar que los contaminantes, además de causar daños a materiales y servicios, pueden suponer un riesgo de toxicidad para la especie humana y los ecosistemas (Alloway, 2003).



Figura 4.11. Aguas de escorrentía tras un episodio de lluvia en El Gorguel



5. DISEÑO DE MUESTREO Y RECOGIDA DE MUESTRAS

5.1. Selección de la zona de estudio.

El objetivo del estudio determina el material empleado, la profundidad de la muestra, los métodos analíticos empleados, el procesamiento de los mismos y el tamaño del área de estudio, así como la densidad de los puntos, que es de gran importancia. Existen diversas clasificaciones según la densidad de muestras recogidas (Bradshaw et al., 1972; Ginzburg, 1960; Salminen, 1992). En la clasificación de Salminen (1992) se establecen tres clases de estudios: (i) Escala regional, 0,01-0,1 puntos de muestreo por km²; (ii) Escala local, 0,1-10 puntos de muestreo por km²; y (iii) Escala detallada, desde 10 a 1000 puntos de muestreo por km² (Figura 5.1).

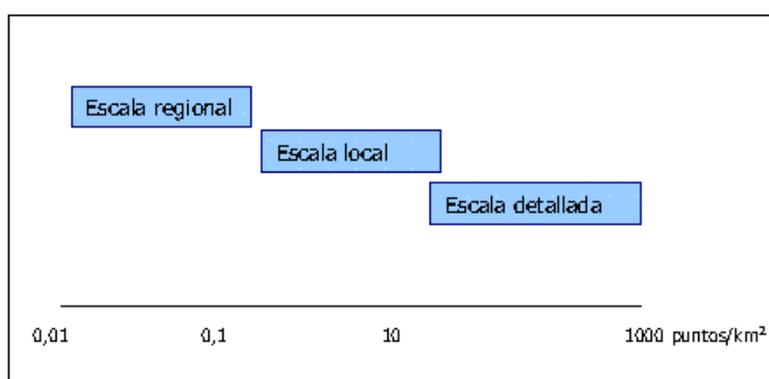


Figura 5.1. Densidad de muestreo para las distintas escalas geoquímicas (Salminen, 1992).

El diseño de muestreo en los estudios geoquímicos y/o de contaminación presenta gran variabilidad, ya que estos estudios pueden estar enfocados a áreas muy extensas (Gustavsson et al., 2001; Salminen et al., 2005) o a zonas concretas (McClenaghan et al., 2001). Para los primeros suelen emplearse pocas muestras por km², aunque siendo un área extensa, el número de muestras final sea elevado. Para los estudios enfocados a una escala pequeña se parte de mayor número de muestras por km² (De Vivo et al., 2008).

Para la selección de la zona de estudio de este trabajo y el diseño del muestreo se han tenido en cuenta las investigaciones anteriores, realizadas por nuestro Grupo de Investigación, "Contaminación de Suelos" (E048-08), de la

Universidad de Murcia, que se han llevado a cabo tanto en el Campo de Cartagena, zona de influencia al norte de la Sierra Minera, como en su vertiente sur, Portman y el Gorguel.

En el Campo de Cartagena, en el ámbito del proyecto DESERTNET, se han monitorizado a escala local los niveles de cadmio, plomo y cinc, cuya distribución geográfica está representada en las Figuras 5.2 a 5.4, observándose claramente los valores más altos en las zonas de influencia de la Sierra Minera (Martínez-Sánchez et al., 2008a; Martínez-Sánchez et al., 2005).

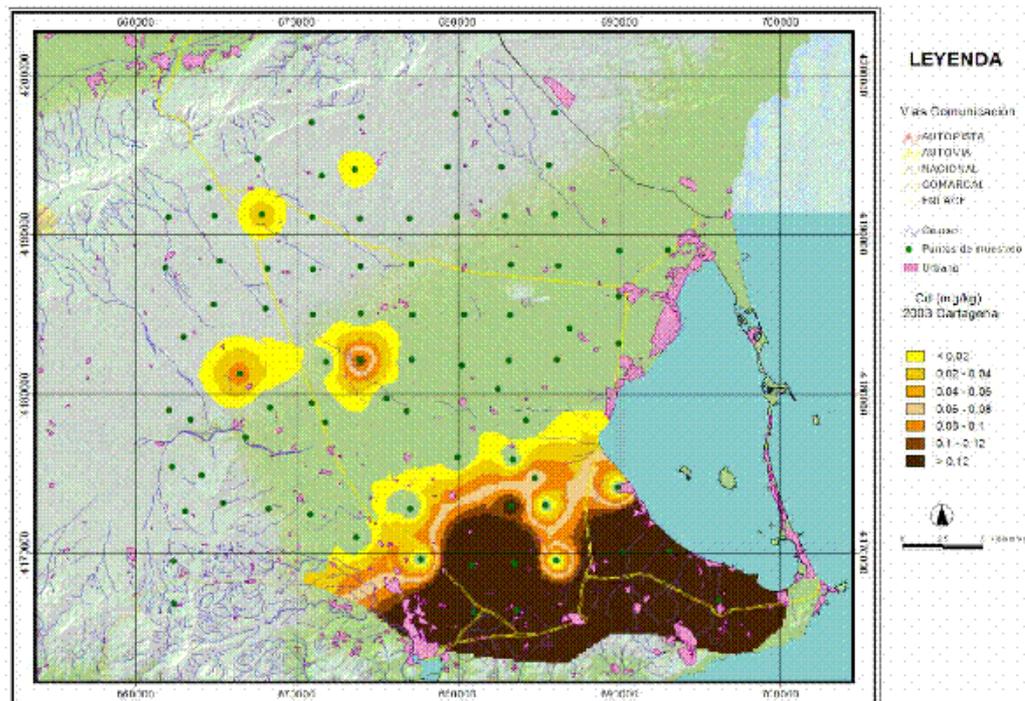


Figura 5.2. Cd total (mg kg^{-1}) en el Campo de Cartagena

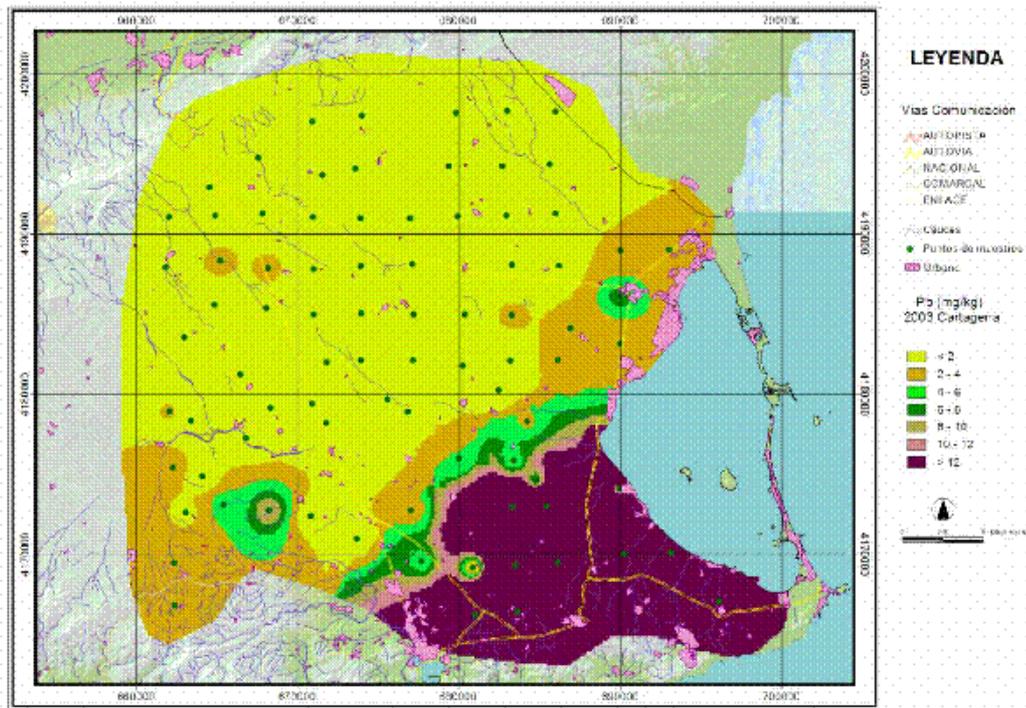


Figura 5.3. Pb total (mg kg^{-1}) en el Campo de Cartagena

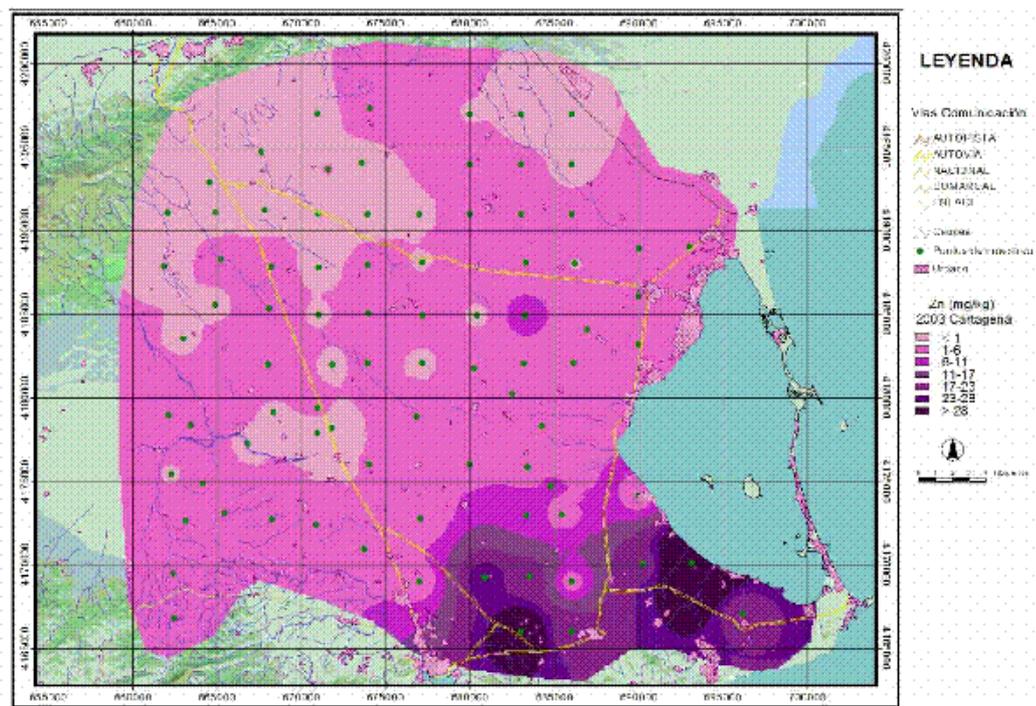


Figura 5.4. Zn total (mg kg^{-1}) en el Campo de Cartagena

Por otra parte, a este mismo nivel de escala, se determinaron en el Campo de Cartagena los niveles de fondo y niveles genéricos de referencia de metales pesados en suelos, dentro del proyecto para toda la Región (Martínez-Sánchez et al., 2007). Las Figuras 5.5 a 5.7 muestran que, si se exceptúa la zona minera, las concentraciones de cinc, cadmio y mercurio son bajas (Pérez-Sirvent et al., 2009).

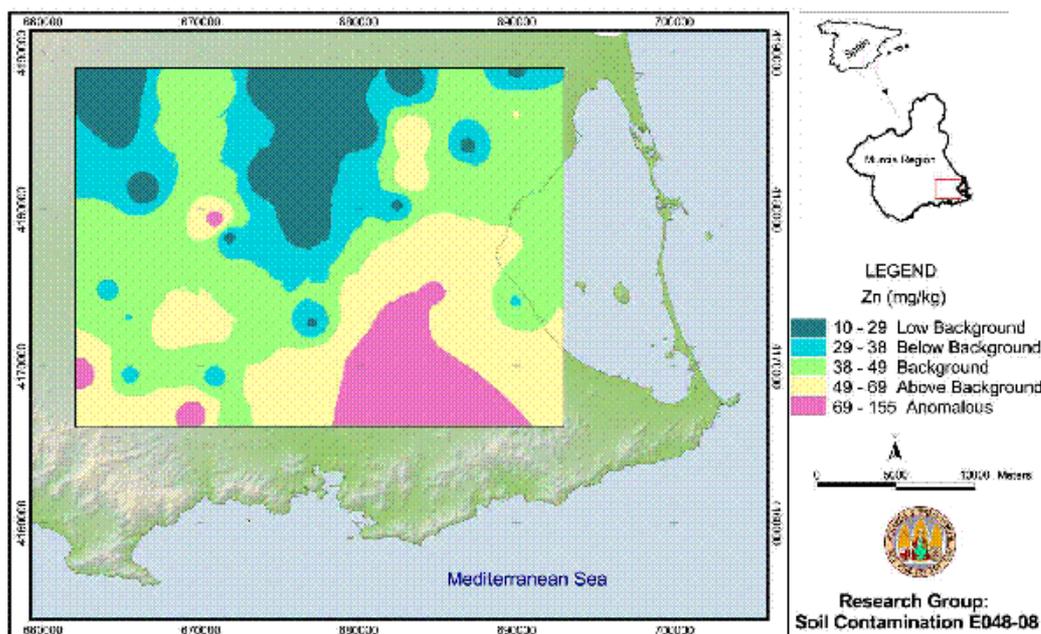


Figura 5.5. Distribución del contenido en Zn en el Campo de Cartagena. (Pérez-Sirvent et al., 2009)

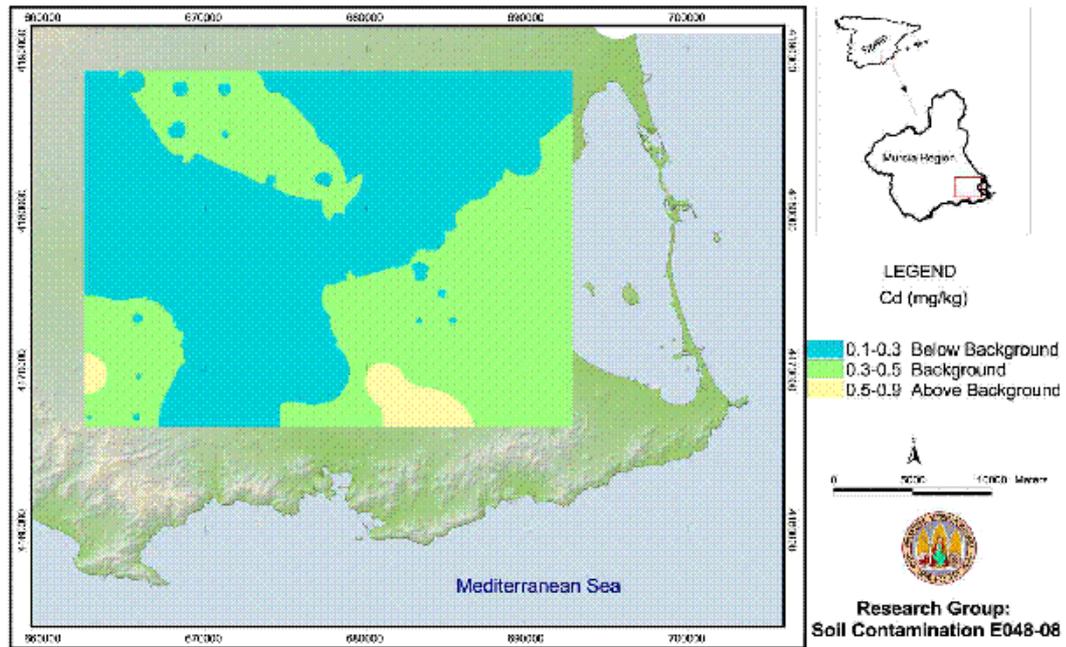


Figura 5.6. Distribución del contenido en Cd en el Campo de Cartagena. (Pérez-Sirvent et al., 2009)

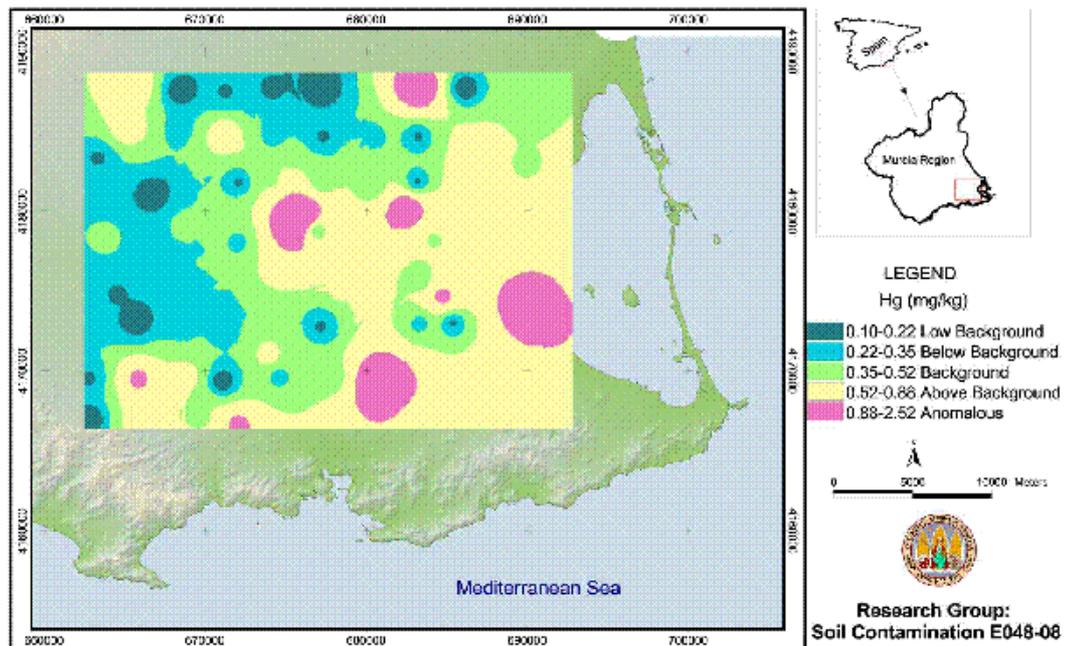
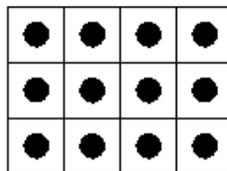


Figura 5.7. Distribución del contenido en Hg en el Campo de Cartagena. (Pérez-Sirvent et al., 2009)

En el caso del proyecto DESERTNET se realizó un estudio sistemático, mientras que en el de la propuesta de niveles de fondo y referencia de metales pesados en la Región (Pérez-Sirvent et al., 2009) se ha realizado un estudio sistemático con zonas de exclusión, en el que los puntos están separados entre sí por una distancia regular y predeterminada.



A partir de los estudios anteriores, se diseñó para el presente estudio un muestreo detallado, de manera que pudieran caracterizarse los focos de contaminación, las vías de transferencia y las zonas de recepción, de acuerdo con el modelo conceptual de las ramblas que aparece en la Figura 5.8.

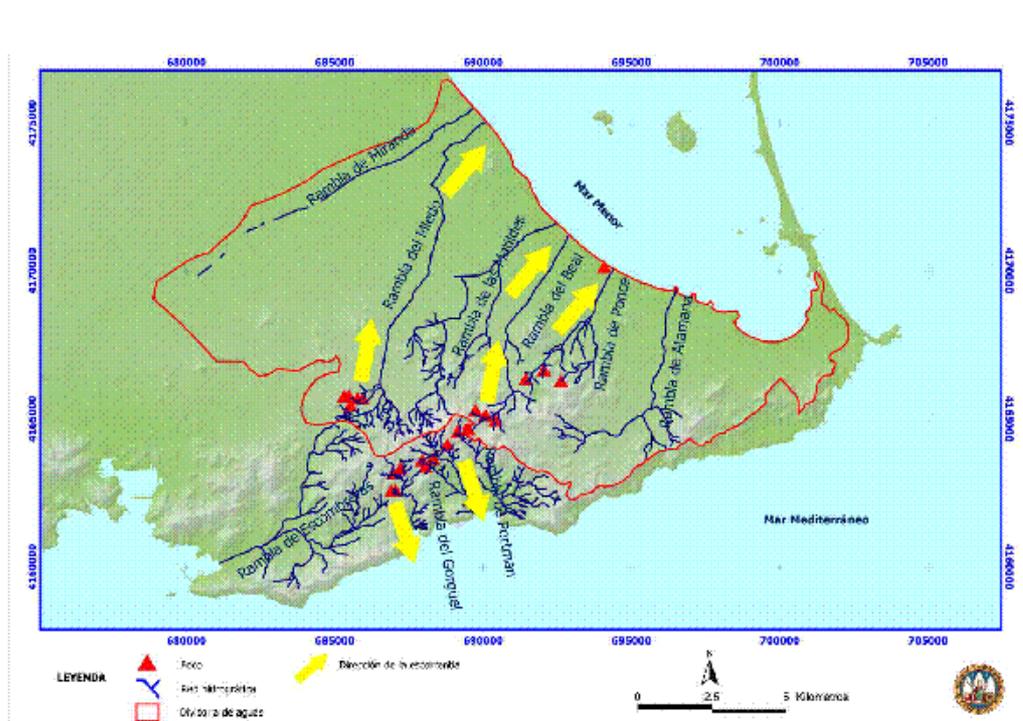


Figura 5.8. Modelo conceptual de la escorrentía en las Ramblas estudiadas

Para poder llevar a cabo este estudio de dispersión, ha sido necesario restituir la cuenca hidrográfica, ya que la intensa actividad minera y agrícola en la zona ha alterado la red hidrográfica inicial. Esta restitución se realizó mediante salidas de campo, levantamiento topográfico y fotografías aéreas.

Basado en este diseño, y también a escala local, no sistemática, se ha llevado a cabo una investigación, tras un convenio entre la Fundación Cluster para la protección y conservación del Mar Menor y la Universidad de Murcia para la delimitación de las zonas con influencia minera y las fuentes contaminantes del Mar Menor (Martínez-Sánchez et al., 2008b y 2008c). En las Figuras 5.9 a 5.11 se observa que los focos contaminantes se encuentran en la Sierra Minera y en una zona próxima al Mar Menor, donde existe un depósito de estériles de flotación, y que las principales vías de dispersión coinciden con los sistemas de ramblas, confirmando las hipótesis de partida que se propusieron cuando comenzaron los estudios para la realización de esta Tesis Doctoral.

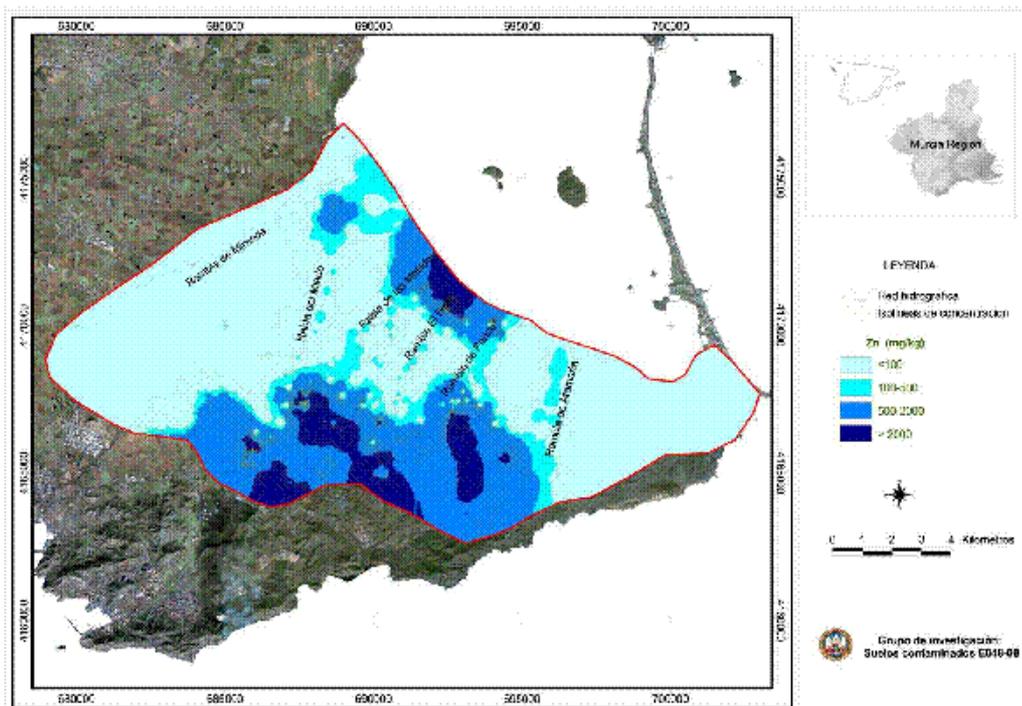


Figura 5.9. Contenido en Zn (mg kg^{-1}) en la vertiente norte de la Sierra Minera

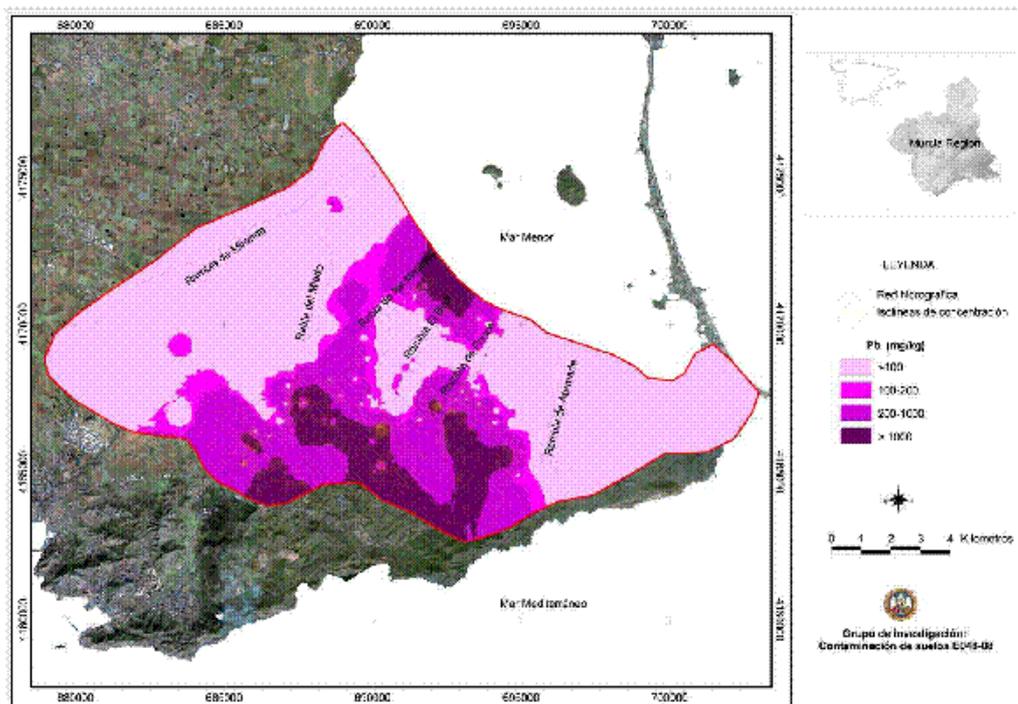


Figura 5.10. Contenido en Pb (mg kg^{-1}) en la vertiente norte de la Sierra Minera

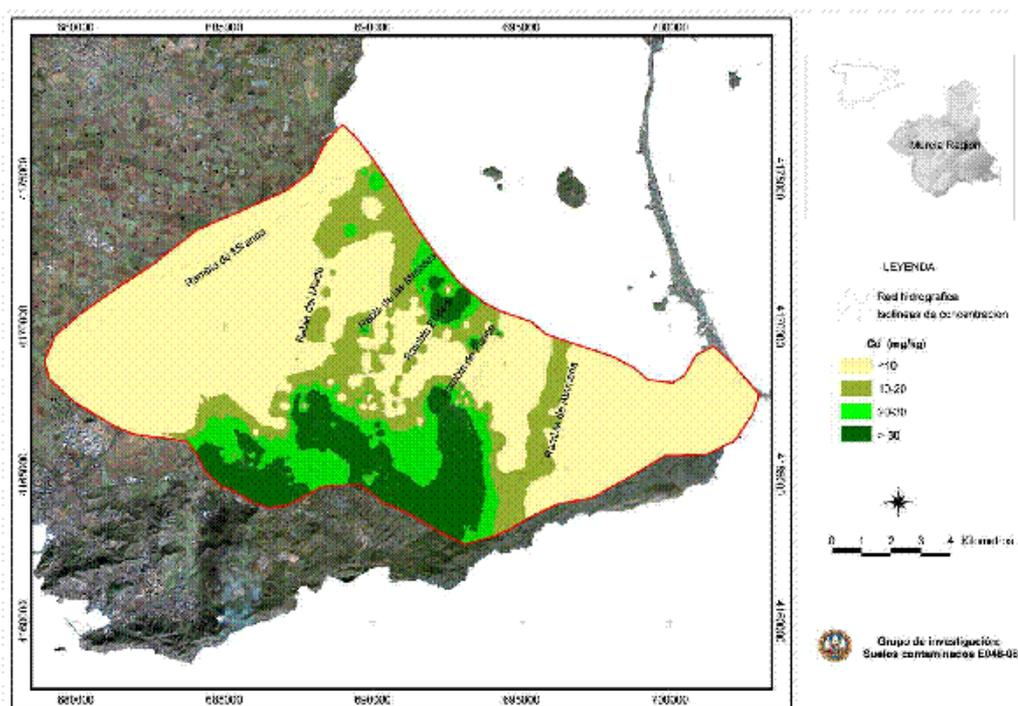


Figura 5.11. Contenido en Cd (mg kg^{-1}) en la vertiente norte de la Sierra Minera

5.2. Selección de zonas de muestreo.

Como se ha comentado en capítulos anteriores, la actividad minera en la Sierra de Cartagena-La Unión ha causado la acumulación de millones de toneladas de residuos.

García García, en 2004, cuantificó la existencia de 89 balsas de flotación, 176 escombreras de mina, 32 depósitos de estériles procedentes del desmonte (vacies) y 2 balsas de flotación con vertido al mar (Tabla 5.1).

Denominación del depósito	Número de depósitos	Extensión (km ²)	Volumen (Mm ³)	V/E
Vacies	32	4,21	135,99	32,30
Balsas de flotación	89	2,18	22,89	10,50
Flotación Mar	2	0,83	25,00	30,12
Terreras de gravimetría	119	0,65	3,73	5,74
Escombreras de mina	176	0,48	3,01	6,27
Escombreras de óxidos	11	0,26	6,93	26,65
Rechazo de granulometría	1	0,06	0,59	9,83
Gacheros	19	0,13	0,66	5,08
Escombreras de pozos mineros	1902	0,02	0,51	25,50
TOTAL de residuos minerometalúrgicos	2351	8,83	199,30	22,57
Cortas mineras	12	2,40	0,00	
TOTAL estructuras mineras	1363	11,23	199,30	

Tabla 5.1. Extensión y volumen ocupado por las diferentes estructuras mineras (García García, 2004)

Según la distribución de los depósitos de residuos mineros por cuencas hidrográficas de las ramblas (Tabla 5.2), establecida por García García (2004), se observa que en la vertiente meridional son las Ramblas del Gorguel y Portman las que tienen un mayor porcentaje de afectación del total de su superficie, mientras que en la vertiente septentrional son las Ramblas de Ponce, el Beal, las Matildes y el Miedo.

Cuenca hidrográfica de la rambla	Número de 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

Tabla 5.2. Distribución de los depósitos de residuos mineros por cuencas hidrográficas de ramblas (García García, 2004)

Martínez-Sánchez et al., (2007) y Navarro Hervás, (2004), determinaron las características generales en muestras de focos contaminantes en la Sierra Minera, que se recogen en la Tabla 5.3, así como los contenidos en metales pesados en la Sierra Minera en la Tabla 5.4, en la Bahía de Portman en la Tabla 5.5 y en sedimentos de Lo Poyo en la Tabla 5.6.

Los valores máximos corresponden a balsas de estériles de flotación, que a pesar de que su extensión y volumen no es muy elevado, presentan la máxima reactividad.

	pH	CaCO ₃ eq. (%)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Gravas (%)
Máximo	5,3	16,5	28,1	71,1	87,8	88
Mínimo	2,5	0	2,3	5,3	5,7	7
Media	4,2	1,5	10,1	28,9	60,7	50,4

Tabla 5.3. Características generales de las muestras de foco contaminante en las zonas estudiadas

	Zn (mg kg ⁻¹)	Pb (mg kg ⁻¹)	Cd (mg kg ⁻¹)
Máximo	53120	322	24340
Mínimo	10140	31	7180
Media	624	1	228

Tabla 5.4. Contenido medio en metales pesados en la Sierra Minera

	Zn (mg kg ⁻¹)	Pb (mg kg ⁻¹)	Cd (mg kg ⁻¹)
Máximo	26800	19600	75
Mínimo	208	822	0,5
Media	2830	4910	12

Tabla 5.5. Contenido medio de metales en sedimentos de la Bahía de Portman

	Zn (mg kg ⁻¹)	Pb (mg kg ⁻¹)	Cd (mg kg ⁻¹)
Máximo	53125	322	24338
Mínimo	624	0,7	228
Media	10141	31	7177

Tabla 5.6. Contenido medio de metales en sedimentos de Lo Poyo

Basándonos en todo lo mencionado anteriormente, dentro del área de estudio y para la selección de los puntos de muestreo, se han establecido cinco zonas representativas (Figura 5.12) de los procesos que tienen lugar en la misma, siguiendo los criterios de influencia variable de las balsas de estériles (primaria, secundaria y terciaria) y características mineralógicas similares.

Estas cinco zonas se dividen en dos grupos:

1. En la Sierra Minera propiamente dicha:

- Cabezo Rajao (Zona C)
- Llano del Beal (Zona B)
- El Gorguel (Zona D)

2. Fuera de la Sierra Minera pero que actúan como focos:

- Vertido al mar: Portman (Zona E)
- Vertido en tierra pero cercano al mar: Lo Poyo (Zona A).

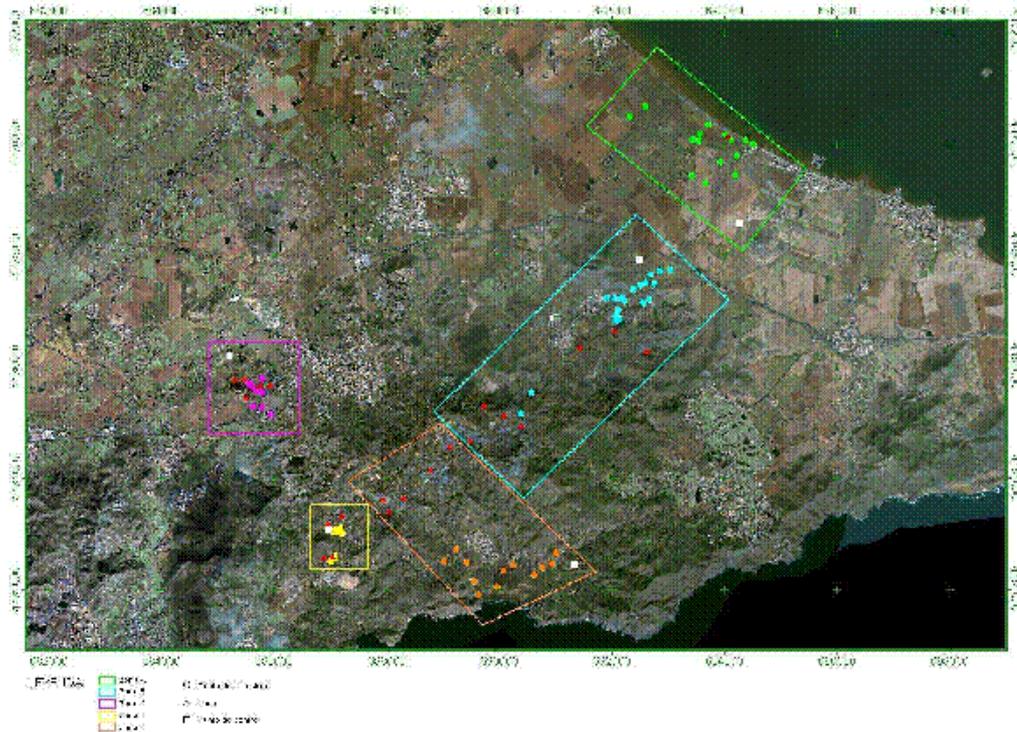


Figura 5.12. Zonas de estudio en el área de estudio

5.2.1. Lo Poyo (Zona A).

La zona A (Lo Poyo) es la más alejada de la Sierra Minera, tiene una situación topográfica deprimida y está afectada por la Rambla del Beal y la Rambla de Ponce, limitando con el Mar Menor (Figura 5.13).



Figura 5.13. Fotografía aérea de la zona A- Lo Poyo

En esta zona se produce sedimentación de materiales aluviales de las Ramblas del Beal y de Ponce, que transportan materiales mineralizados por dos vías diferentes (Figura 5.14):

- Transporte natural de rambla: desde muy antiguo, cuando se ha efectuado un transporte por medios naturales, aún en condiciones turbulentas y aportando grandes cantidades de material particulado de textura gruesa, el sedimento depositado por estas ramblas tiene unas características físico-químicas diferentes al material existente en balsas y escombreras. Se presenta granoseleccionado, con un mayor porcentaje de fracción limosa, mezclado con sedimentos carbonatados, procedentes de los suelos que atraviesa la rambla, y se han producido reacciones de neutralización, complejación y carbonatación, encontrándose los elementos traza con una movilidad muy reducida.

En definitiva, ha tenido lugar un proceso de atenuación natural de la contaminación y por tanto se trataría de una contaminación terciaria, correspondiendo con la zona menos influida por la actividad minera.

- Transporte antrópico o forzado: con conducciones o medios artificiales desde la Sierra Minera y descarga directa. Es por ello que los sedimentos que se encuentran en la zona central, protegida de Lo Poyo, no están afectados por los procesos naturales de atenuación físico-química y granoselección que tendrían lugar durante el transporte, tratándose de un depósito o balsa de flotación, que a su vez actúa como foco de contaminación primaria (Martínez-Sánchez et al., 2008b y 2008c).



Figura 5.14. Paraje de Lo Poyo.

En esta zona existen además suelos calizos, de tradición agrícola, con cultivos hortícolas a cielo abierto y en invernaderos. En el área de alimentación de dichas ramblas, que funcionan con un cauce de agua corto y discontinuo, se reciben grandes aportes procedentes de flujos laterales constituidos por materiales pertenecientes a la zona minera y de los cultivos circundantes (Figura 5.15) (Martínez-Sánchez et al., 2008b y 2008c).



Figura 5.15. Cauce de la Rambla barranco de Ponce

5.2.2. Llano del Beal (Zona B).

La zona B está situada en los alrededores de la pedanía del Llano del Beal. Tiene una topografía accidentada y se encuentra en la divisoria de la cuenca vertiente hacia el Mar Menor y el Mar Mediterráneo (Figura 5.16).

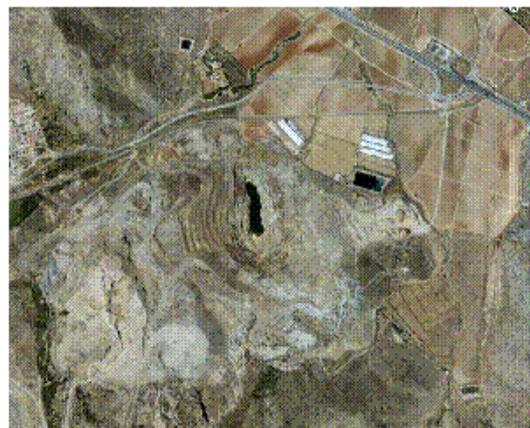


Figura 5.16. Fotografía aérea de la zona B- Llano del Beal

El área está drenada por numerosos barrancos y arroyos que finalmente conforman las Ramblas del Beal y de Ponce, desembocando ambas en el Mar Menor.

La intensa actividad minera a lo largo de los años ha provocado cambios drásticos en la geomorfología, con una intensa remoción del terreno, debido a las labores de explotación, que se traduce en la aparición de numerosos barrancos de corta, huecos y balsas de estériles.

Las cortas explotadas en esta zona se encuentran actualmente rellenas, de manera parcial, por los estériles de la explotación Los Blancos.

Además de las cortas existen numerosas balsas de estériles de flotación, con gran cantidad de materiales procedentes del arrastre por erosión, entre las que destacaba Yenny, situada en la zona sureste del Llano del Beal, que se formó con materiales depositados por el lavadero de flotación diferencial denominado Segunda Paz. Los estériles comenzaron a depositarse aproximadamente en el año 1950, cesando dicho depósito en 1970.

Dado el gran volumen de estériles presentes en esta balsa y el riesgo de dispersión hídrica de elementos traza que presentaba, actualmente se encuentra en proceso de recuperación, con traslado de los estériles a vertedero controlado.

5.2.3. Cabezo Rajao (Zona C).

La zona C se corresponde con el Cabezo Rajao y sus inmediaciones. Se trata de un conjunto de tres relieves volcánicos: Cabezo Rajao, San Carlos y Monte Agudo, profundamente afectados por la minería desde muy antiguo (Figura 5.17).

También se seleccionó un punto de muestreo en la zona colindante al Cabezo Rajao por su parte sureste, para estudiar la influencia de la mina Brunita sobre las aguas y sedimentos.

Se puede dividir en dos zonas: una correspondiente a la zona del Cabezo Rajao y otra a la zona de balsas que lo rodean.

Ambas actúan como focos de contaminación, suministrando material particulado mineralizado y drenajes ácidos a mitad de ladera, en zonas afectadas

por el nivel freático en épocas húmedas. El material, de naturaleza volcánica, es mayoritariamente de textura gruesa, correspondiente a la ganga de la explotación, pero se encuentra mezclado en distintas zonas con restos de balsas muy antiguas, que aportan materiales de textura más fina, y con restos de escorias de fundición.



Figura 5.17. Fotografía aérea de la zona C- Cabezo Rajao

Las pendientes son muy fuertes y la erosión que presenta es intensa, afectando a los taludes que se modifican con la acción de las lluvias y el viento. El conjunto constituye un lugar de interés geológico y paisajístico y un conjunto patrimonial histórico-industrial de gran valor (Figura 5.18).

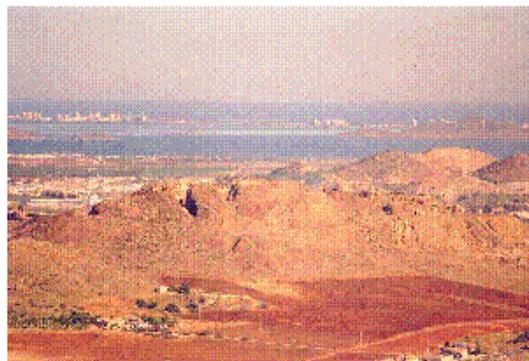


Figura 5.18. Imagen del Cabezo Rajao

Las inmediaciones del Cabezo constituyen una zona muy alterada con balsas de distintas épocas, algunas con un grado de estabilización muy aceptable

y otras sin ninguna protección, sometidas a intensos procesos de erosión. Predominan los materiales de textura fina con un alto contenido en elementos traza, muy reactivos y con valores de pH muy bajos.

En estas balsas se da la formación de aguas de drenaje ácido de mina y cuando estas aguas sufren un proceso de evaporación, se forman eflorescencias, generalmente formadas por sulfatos solubles como rocenita, copiapita, bianchita o hexahidrita.

El material de las balsas está constituido mayoritariamente por jarositas, clorita, mica, cuarzo, yeso e oxihidróxidos de hierro (Martínez-Sánchez et al., 2008b; Navarro Hervás, 2004).

En esta zona se inician algunas de las ramblas que van hacia el Mar Menor, fundamentalmente la Rambla del Miedo.

5.2.4. El Gorguel (Zona D).

En esta zona se construyó en 1940 el primer lavadero de flotación, El Concilio. Presentaba una capacidad de tratamiento de 150 t/día, cesando su actividad en 1964.

El valle del Gorguel se desarrolla a lo largo de la falla del mismo nombre, desde la refinería de Escombreras hasta el cabezo del Pino, con una longitud de unos 5 km. En ella se han inventariado 9 balsas de estériles de flotación con vertido a tierra, que presentan escasa compactación (Figura 5.19).



Figura 5.19. Fotografía aérea de la zona D- El Gorguel

El régimen torrencial de las lluvias de la zona, concentradas en pocas horas, provoca fenómenos de erosión sobre estos materiales poco compactos y sin cubierta vegetal.

El resultado de estos procesos es la aparición de profundos barrancos y cárcavas, junto con el desplazamiento de los materiales hasta su depósito en lugares topográficamente más bajos.

Estos fenómenos de erosión y encaje de los cursos de agua se producen sobre los materiales depositados tras la actividad minera, buscando, por erosión remontante, obtener de nuevo el equilibrio, perdido tras la remoción del terreno.

Es zona de recogida y de dispersión en forma particulada muy importante, de ahí su importancia, tanto desde el punto de vista cualitativo como cuantitativo.

5.2.5. Portman (Zona E).

La Rambla de Portman se encuentra afectada por las escorrentías de diferentes balsas situadas a lo largo de su cauce, desembocando en la Bahía de Portman, gran balsa de flotación con vertido al medio marino.

La Bahía de Portman se encuentra en la actualidad totalmente aterrada por sedimentos procedentes del vertido del lavadero Roberto, que comenzó su funcionamiento en los años cincuenta. El mineral llegaba previamente molido a este lavadero donde sufría una molienda secundaria y se sometía a un proceso de flotación diferencial para la separación del mineral. Los productos de desecho eran transportados mediante una tubería, vertiéndose directamente al Mar Mediterráneo (Figura 5.20)

Aunque los puntos de vertido se trasladaron varias veces, debido a las corrientes predominantes en la zona, la bahía fue progresivamente colmatándose de residuos de mineral, ya que los vertidos no cesaron hasta 1991. El vertido estaba compuesto por el propio estéril, con niveles elevados en elementos traza, y por otras sustancias utilizadas en el proceso de separación del mineral como cianuro sódico, ácido sulfúrico, xantatos, sulfato de cobre, etc. Estudios

anteriores realizados en la bahía destacan como principales contaminantes plomo, cinc, cadmio y arsénico (Martínez-Sánchez et al., 2008d).



Figura 5.20. Fotografía aérea de la zona E- Portman

Aunque tras el cese de los vertidos se ha podido alcanzar un cierto estado de equilibrio, los sedimentos están sometidos a la dinámica marina, especialmente los más próximos a la línea de mar, y a los efectos de las lluvias, escorrentías y otros vertidos (Figura 5.21)

La granulometría define el origen del sedimento; la textura fina corresponde a estériles sin lavar y la textura gruesa a estéril lavado. La alternancia en la textura da lugar a diferentes condiciones de permeabilidad y aireación, lo que puede explicar algunos encostramientos encontrados en los perfiles, así como la formación de charcos de diferentes extensiones.



Figura 5.21. Fotografía de la Bahía de Portman

Los estériles que han colmatado la bahía están compuestos básicamente por: arcilla, cuarzo (SiO_2), siderita (FeCO_3), magnetita (Fe_3O_4), pirita (FeS_2) y restos de esfalerita o blenda (ZnS), y galena (PbS), junto a otros minerales que se han formado en el proceso de alteración supergénica como jarositas, oxihidróxidos de hierro o yeso (Figura 5.22) (Martínez-Sánchez et al., 2008d).

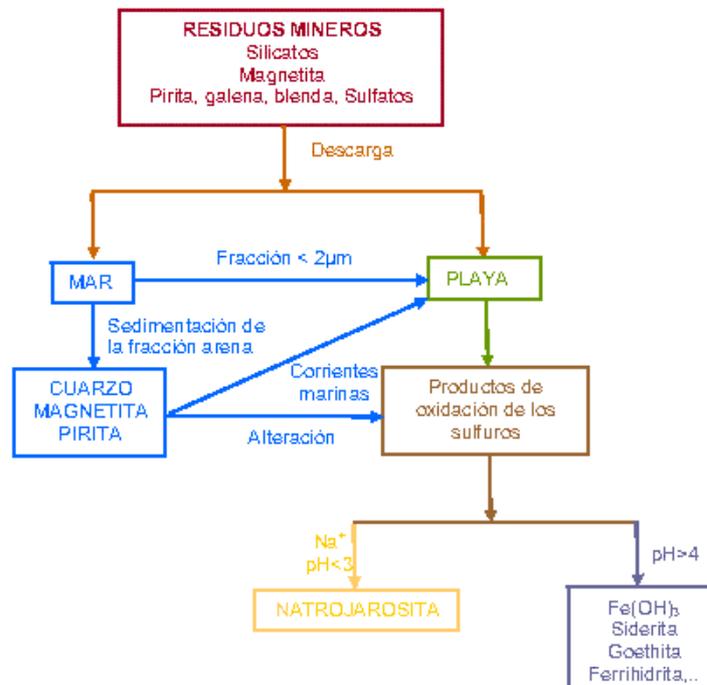


Figura 5.22. Minerales y procesos en la Bahía de Portman

5.3. Puntos de muestreo y tipos de muestras.

En los mapas realizados de cada zona, se han marcado las diferentes balsas de estériles de flotación existentes, que actúan como focos de contaminación en las cabeceras de las ramblas, y que no han sido objeto de este muestreo. Aparecen en la cartografía, a modo indicativo, como triángulos rojos.

Se han recogido diferentes tipos de muestras en las ramblas y sus proximidades, representadas en la cartografía con diferentes símbolos (Figuras 5.23 a 5.27 y Tablas 5.7 a 5.11):

- Sedimentos y aguas en ramblas (círculo azul).

- Sedimentos de ramblas (círculo amarillo).
- Suelos y plantas (círculo verde).
- Suelo control (cuadrado rosa).

A la hora de realizar el muestreo se distinguió entre suelos y sedimentos atendiendo a la definición de la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999) en la que se define suelo como aquella entidad natural presente en la superficie terrestre que ocupa un espacio y está compuesta por tres fases: líquida, sólida y gaseosa. Además, el suelo se caracteriza por cumplir al menos uno de los siguientes requisitos: i) estar dividido en horizontes diferenciados del material original como resultado de adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones de materia y energía; ii) presentar la capacidad de albergar plantas vasculares en condiciones naturales.

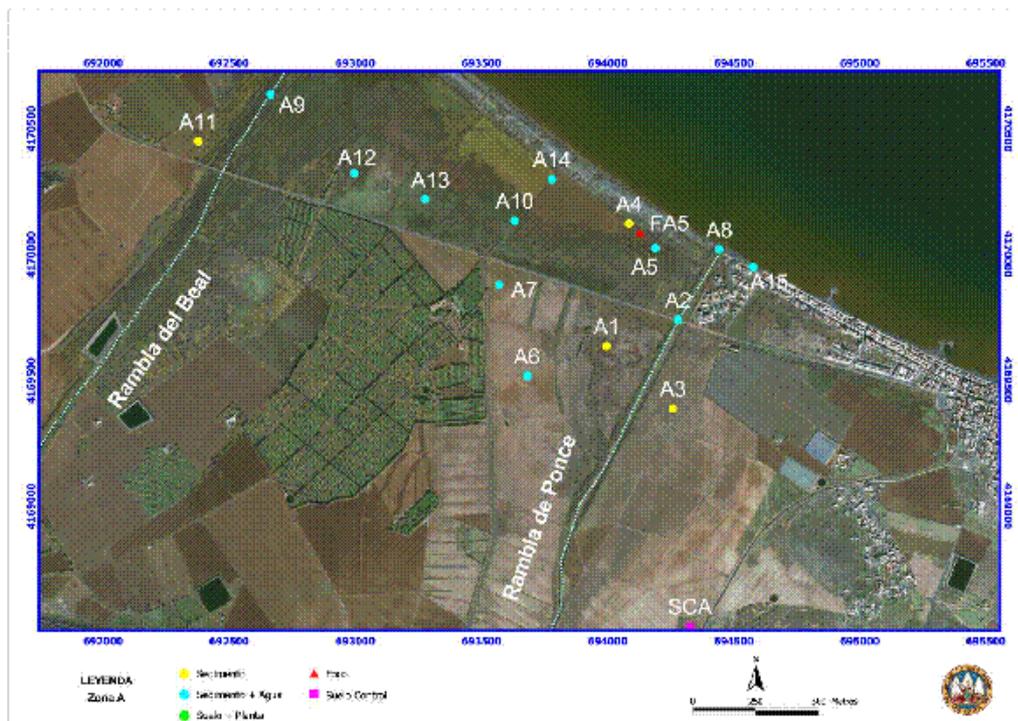


Figura 5.23. Muestras recogidas en la Zona A- Lo Poyo

Sedimentos	Sedimentos+aguas	Suelo+ planta
4	11	

Tabla 5.7. Muestras recogidas en la Zona A

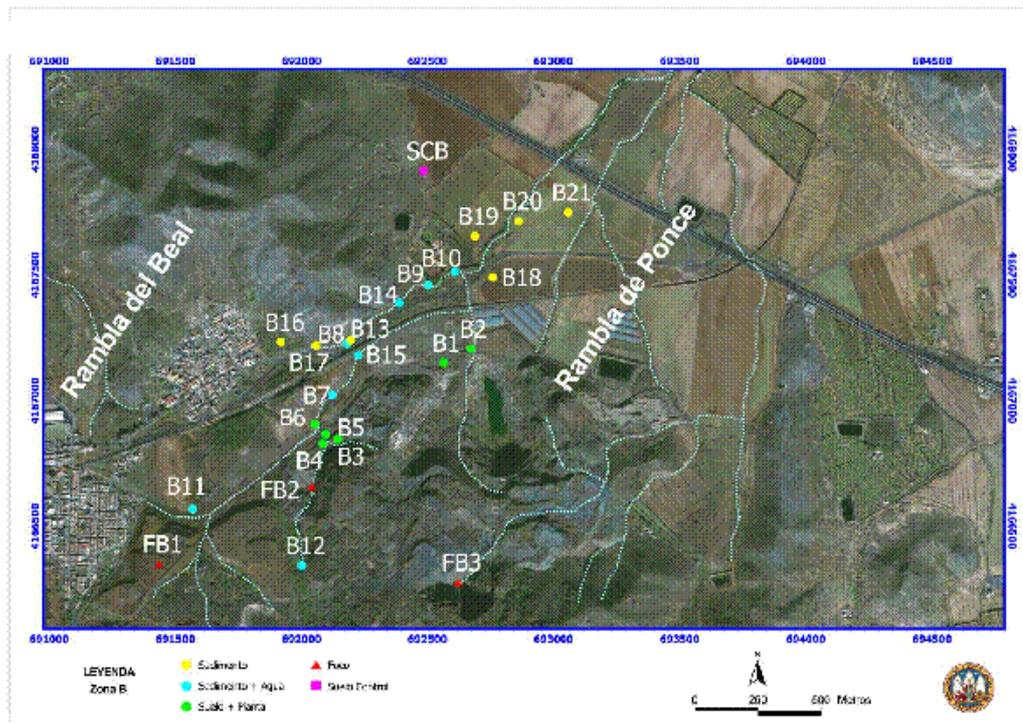


Figura 5.24. Muestras recogidas en la Zona B- Llano del Beal

Sedimentos	Sedimentos+aguas	Suelo+planta
7	8	6

Tabla 5.8. Muestras recogidas en la Zona B

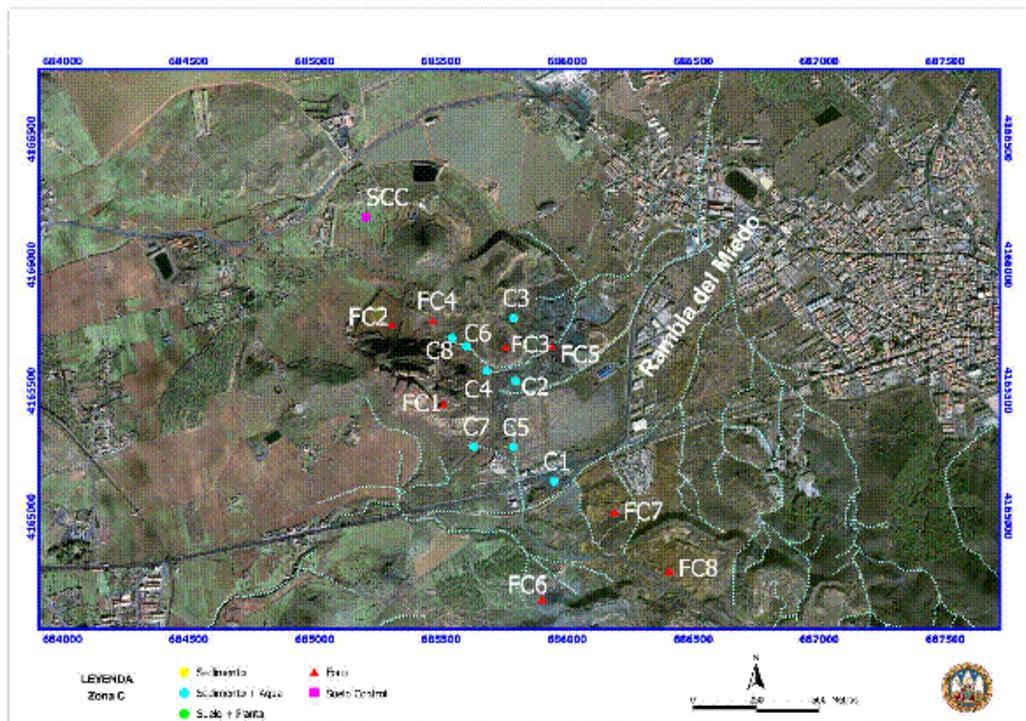


Figura 5.25. Muestras recogidas en la Zona C- Cabezo Rajao

Sedimentos	Sedimentos+aguas	Suelo+ planta
	8	

Tabla 5.9. Muestras recogidas en la Zona C

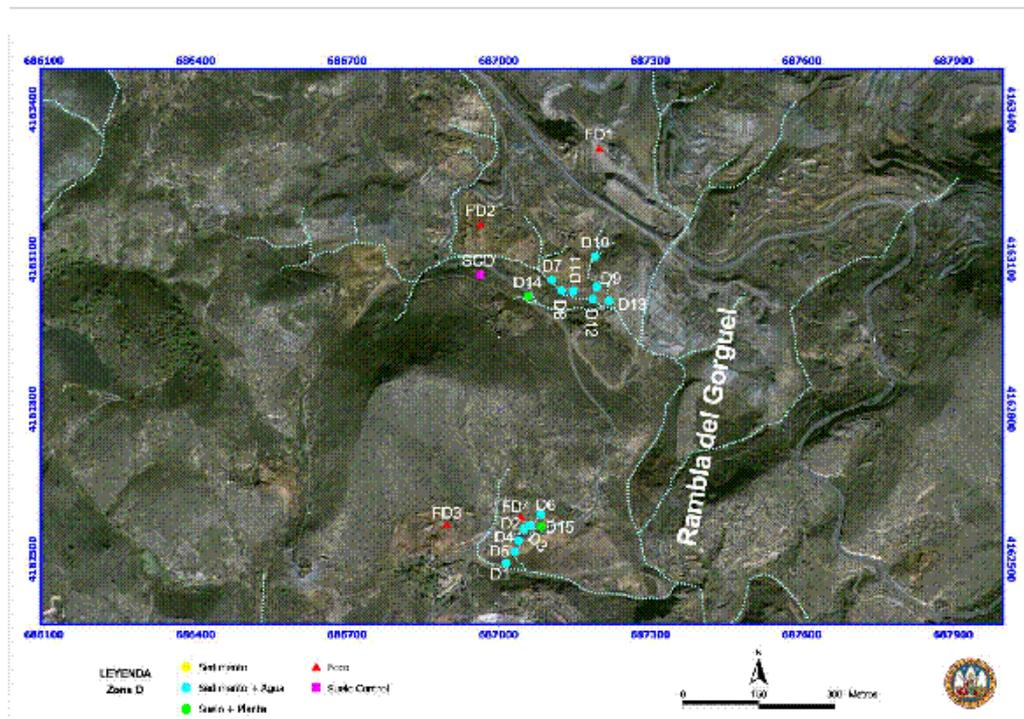


Figura 5.26. Muestras recogidas en la Zona D- El Gorguel

Sedimentos	Sedimentos+aguas	Suelo+planta
	13	2

Tabla 5.10. Muestras recogidas en la Zona D

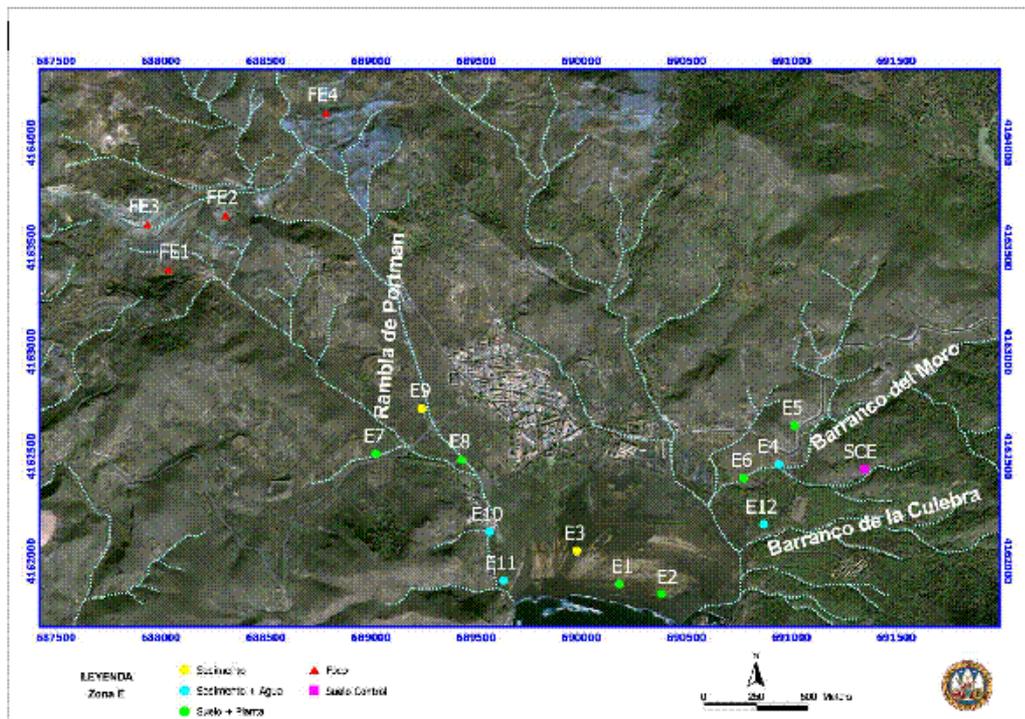


Figura 5.27. Muestras recogidas en la Zona E- Portman

Sedimentos	Sedimentos+aguas	Suelo+ planta
2	4	6

Tabla 5.11. Muestras recogidas en la Zona E

5.4. Recogida de muestras.

El objetivo de la toma de muestras es recoger una porción del material que se desea analizar, suficientemente pequeña para ser transportada adecuadamente y manejada en el laboratorio, mientras todavía represente fielmente el material muestreado.

A la hora de recoger las muestras y asegurar la calidad del muestreo se tomaron las siguientes medidas:

- Entre el 10-15% de las muestras se recogió por duplicado.
- En muestras de suelo y sedimento se recogieron muestras control.
- En el laboratorio se usaron materiales estandarizados de referencia.
- Durante el muestreo y para evitar posible contaminación se usaron guantes de plástico y se evitó la cercanía de vehículos en movimiento.

En cada punto de muestreo se realizó una ficha de campo, con el objeto de que detallar aquellas características de la muestra y una fotografía del punto (Anexo I).

5.4.1. Muestras de agua de escorrentía.

Las muestras de agua de escorrentía se recogieron en el mismo lugar en el que se recogió el sedimento, y cada una es el resultado de la mezcla de varias muestras recogidas a lo largo de un tramo, con una separación de 10-20 metros.

En nuestro caso, las muestras se tomaron tras un episodio de lluvia ya que en la zona no existen corrientes continuas de agua.

Una vez recogida, se dividió en tres submuestras:

- Muestra sin filtrar para el análisis de los iones por cromatografía iónica.
- Muestra filtrada para la determinación de elementos traza (a excepción del mercurio).
- Muestra sin filtrar para la determinación del contenido en mercurio.

La filtración se llevó a cabo utilizando filtros de 0,45 μm colocados sobre jeringuillas.

Una de las alícuotas de muestra filtrada se acidificó el mismo día del muestreo con 1 ml de ácido nítrico.

La alícuota a la que se determinó mercurio fue acidificada con 5 ml de una solución de ácido nítrico y dicromato potásico, y se almacenó en un frigorífico hasta su análisis.

Todas las muestras de agua fueron recogidas en envases de plástico de polietileno con cierre hermético que, previamente a su uso, se lavaron con ácido nítrico diluido y se enjuagaron varias veces con agua ultrapura. En el momento de la toma de muestra, se realizaron varios enjuagues con la propia agua antes de ser recogida.

Parte de esta muestra homogeneizada se procesó para las analíticas programadas y el resto permanece almacenada como un reservorio control conservado a 4 °C.

5.4.2. Muestras de sedimento.

Las muestras de sedimento se recogieron a la vez que las aguas de escorrentía, en el mismo tramo. Dentro de cada zona, las muestras estaban separadas entre sí una distancia de entre 10 y 20 m.

En cada punto de muestreo, se tomaron cinco muestras de la capa superficial de suelo (0-25 cm) en el centro y en los extremos de las diagonales de una cuadrícula de 1 metro de lado, obteniendo en cada punto una muestra completa.

En cada punto se recogieron de 1 a 2 kg de suelo, que posteriormente se mezclaron y homogeneizaron, tomando finalmente una muestra compuesta (ISO, 1995) representativa del punto de muestreo.

Cada muestra de sedimento recogida debía incluir al menos 0,5 kg de la fracción menor de 0,20 mm.

En cada una de las zonas se recogió una muestra control, no afectada por la actividad minera, que fueron almacenadas y procesadas del mismo modo que las otras muestras.

Las muestras recogidas se almacenaron en bolsas de plástico, que permanecieron cerradas y selladas hasta su procesamiento.

5.4.3. Muestras de sedimento saturadas en agua.

En aquellos puntos en los que fue posible, se recogieron muestras de sedimento saturadas en agua para la obtención del agua de poro. La muestra se recogió en recipientes herméticos que se transportaron en ausencia de luz y se mantuvieron refrigerados hasta su análisis.

5.4.4. Muestras de suelo y vegetales.

En los lugares con vegetación natural, se recogieron muestras de plantas junto con el suelo subyacente. Una vez en el laboratorio, las muestras vegetales se lavaron con agua ultrapura, se liofilizaron y almacenaron hasta su análisis.

Las muestras de suelo, una vez recogidas, se trataron en el laboratorio del mismo modo que los sedimentos.



6. METODOLOGÍA

6.1. Sedimentos y suelos.

6.1.1. Descripción de las muestras.

La descripción de las características más representativas de las muestras en lo que respecta a la localización y descripción del material: color en húmedo y en seco (Soil Color Charts Munsell, 1992), manchas de color, textura, estructura, consistencia en húmedo y en seco, poros y contenido de fragmentos de rocas y minerales, se realizó según la metodología propuesta por FAO en la Guía para la descripción de perfiles de suelos (1977).

6.1.2. Determinaciones analíticas generales.

Las muestras fueron secadas al aire y posteriormente se separó la fracción tierra fina (<2 mm) de las gravas, que fueron cuantificadas.

A la fracción tierra fina se le realizaron las siguientes determinaciones analíticas:

- **pH:** Medido en H₂O y KCl 1M en la suspensión 1:5 (suelo:agua) con un pHmetro Crison GLP21 (Figura 6.1).
- **Conductividad eléctrica:** Medida en el extracto 1:5 (suelo: agua) y expresada en dS m⁻¹ con un conductímetro Crison GLP31.
- **Potencial redox:** Medido en el extracto 1:5 (suelo: agua) y expresada en mV.
- **Materia orgánica:** Se siguió el método de Anne (1945), modificado por Duchaufour (1970) para calcular el contenido en carbono orgánico. El contenido de materia orgánica se calculó multiplicando el valor obtenido de carbono orgánico por el factor 1,72 y el resultado se expresó en porcentaje (%).
- **Carbonato cálcico equivalente:** Se determinó mediante el método volumétrico del calcímetro de Bernard, que previamente fue calibrado frente a Na₂CO₃ R.A., partiendo del peso adecuado de tierra fina,

según su contenido en carbonatos (Hulseman, 1966; Muller y Gatsner, 1971). Los resultados se expresaron en porcentaje (%).



Figura 6.1. pHmetro y conductímetro

6.1.3. Análisis granulométrico.

El análisis granulométrico se realizó utilizando el analizador de partículas LS-13320 de Beckman Coulter, que determina la distribución del tamaño de partículas suspendidas en un líquido o en forma de polvo seco utilizando los principios de dispersión de la luz.

Consiste en un banco óptico y diferentes módulos: el Módulo de Líquido Universal (ULM), el Módulo de Líquido Acuoso (ALM), el Sistema Tornado de Polvo Seco (DPS) y el Módulo Micro Líquido (MLM). El LS-13320 incorpora la tecnología de PIDS, patentada por Beckman Coulter, para suministrar un alcance dinámico que abarque desde 0,04 hasta 2000 μm (Figura 6.2).

Se ha realizado un análisis granulométrico en seco y en húmedo de las muestras previamente homogeneizadas. Para el análisis en húmedo es necesario dispersar la muestra, en este caso con calgón, que no reacciona ni química ni físicamente con la muestra y cuyo color es diferente al del láser. A 5 g de la muestra se adicionaron 5 ml de calgón y 50 ml de agua ultrapura (MilliQ) y se dejó agitar durante 24 horas a unas 15 rpm para dispersar los posibles agregados.

Todas las medidas se realizaron por duplicado y el valor obtenido es la media de ambos.

Se determinaron los porcentajes de:

- arcilla ($\phi < 2 \mu\text{m}$).
- limo fino ($2-20 \mu\text{m } \phi$).
- limo grueso ($20-50 \mu\text{m } \phi$).
- las fracciones de arena de 50-100, 100-250, 250-500, 500-1000, 1000-2000 μm .

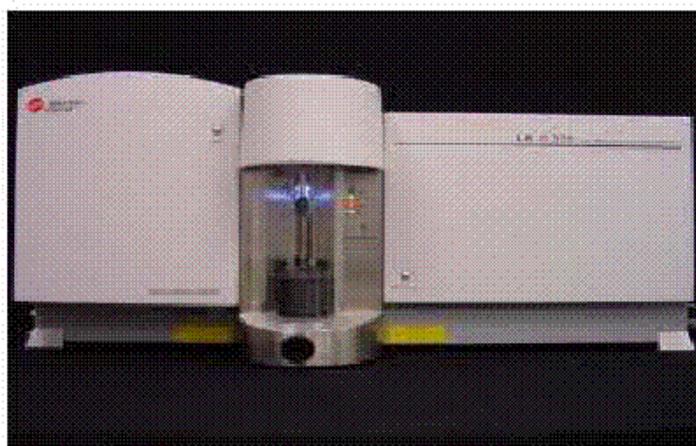


Figura 6.2. Analizador de tamaño de partículas LS 13320 Beckman Coulter

6.1.4. Difracción de Rayos X.

Se realizó un estudio de la composición mineralógica de las muestras sin tratar (fracción menor de 2 mm) y de los residuos obtenidos en las diferentes extracciones.

Para tal fin, se utilizó un espectrómetro Philips X'Pert con anticátodo de cobre (Figura 6.3), provisto de procesador PDP 11/23 con Winchester de 10 Mb, terminal VT220B y software Philips X'Pert desarrollado por Philips Electronics N.V. 1996-1999 (versión 1.2d). Las condiciones instrumentales se han adaptado a los objetivos a alcanzar variando la sensibilidad del registro dependiendo de cada muestra (Tabla 6.1).



Figura 6.3. Difractómetro de Rayos X

Se realizó un análisis cualitativo con un Difractómetro de RX Philips PW3040 con rendija de ventana 1°, contador proporcional y filtro de níquel.

Para el estudio de la mineralogía, la fracción molida en molino de bolas, menor de 50 μm se depositó en un portamuestras de aluminio, de características específicas para el Difractómetro de RX Philips PW3040. La muestra se compactó con un pistón macizo para que quedara homogénea y firme, siendo posteriormente introducida en el carro portamuestras del que dispone el Difractómetro.

Parámetros	
Radiación (nm)	1,54
Tensión (KV)	45,0
Corriente (mA)	40,0
Rango Angular ($^{\circ}$ 2 θ)	3,02-69,98
Tamaño de paso ($^{\circ}$ 2 θ)	0,04
Cte. tiempo (s)	1

Tabla 6.1. Condiciones instrumentales en el barrido por DRX

6.1.4.1. Análisis mineralógico cualitativo.

La interpretación de los diagramas se realizó con ayuda del programa Philips X'Pert Graphics and Identify perteneciente al software del equipo RX Philips PW3040 y el programa Xpowder (Martín, 2004). Estos programas permiten comparar los picos de difracción del diagrama de la muestra con los del mineral que se busca, determinando la mineralogía que posee la muestra. Para la identificación de picos de difracción se empleó la base de datos (PDF2) teniendo en cuenta que la determinación de minerales por difracción de Rayos X no se asegura si su contenido es menor al 5% del peso total de la muestra (dependiendo de la cristalinidad del mineral).

El programa suministra el listado de los picos de difracción que aparecen en el espectro de la muestra, la intensidad de cada uno de ellos y una lista con los posibles minerales presentes. Ocasionalmente también se utilizaron las fichas informatizadas del J.C.P.D.S. (Joint Committee on Powder Diffraction Standard).

6.1.4.2. Análisis mineralógico semicuantitativo.

Para la cuantificación de los minerales presentes en una muestra, hay que tener en cuenta los distintos factores que Mellinger (1979) resume y que afectan a la intensidad de la reflexión a analizar:

- Las sustituciones isomórficas y la cristalinidad de la muestra (Rodríguez Gallego et al., 1969).
- La homogeneidad de la muestra (Parrish, 1962) y la cantidad empleada (Stokke y Carson, 1973).
- Las condiciones instrumentales y el método empleado en la cuantificación (Pierce y Siegel, 1969).
- El enmascaramiento por sustancias amorfas, el solapamiento de picos de dos o más minerales (Starkey et al., 1984).

Se ha realizado el análisis semicuantitativo para poder utilizar los resultados en la interpretación mineralógica, pero, teniendo en cuenta que los datos no

deben tomarse como valores absolutos de cantidad sino como indicadores relativos de la concentración de cada mineral.

Una vez interpretado el diagrama se determinaron las áreas correspondientes a los minerales identificados y se realizó el análisis semicuantitativo empleando el método de poderes reflectantes (Martín Pozas et al., 1969; Martín Vivaldi et al., 1968). Para realizar dicho análisis se consideraron los poderes reflectantes de las principales fases, que se resumen en la Tabla 6.2.

Mineral	Reflexión	Poder reflectante	Referencia
Cuarzo	4,25 Å	0,5	Cosgrove y Sulaiman (1973)
Calcita	3,03 Å	1	Barahona (1974)
Dolomita	2,88 Å	1	Barahona (1974)
Yeso	7,56 Å	1	Barahona (1974)
Feldespatos	3,24 Å	1	Barahona (1974)
Clorita y Caolinita	7,00 Å	1	Barahona (1974)
Moscovita	10,0 Å	1	Barahona (1974)
Jarosita	3,06 Å	1	-
Ankerita	2,89 Å	1	-
Siderita	2,80 Å	1	-
Pirita	2,70 Å	1	-

Tabla 6.2. Poderes reflectantes utilizados

6.1.5. Análisis termogravimétrico.

Sobre pesadas variables (10-20 mg) de muestras previamente homogeneizadas, se registraron las pérdidas de peso producidas por el efecto térmico generado entre las temperaturas 25-1000 °C. Se empleó un equipo Mettler, mod.TA 3000, TG 50. Las condiciones de trabajo fueron las siguientes:

- Velocidad de calentamiento: 25°C/min.
- Exploración de 25 a 900°C en aire.
- Material de referencia: Corindón (alúmina pura).

Teniendo en cuenta las temperaturas de las señales de las curvas de análisis térmico diferencial (ATD) debidas a deshidrataciones y descarbonataciones (Tabla 6.3) de los componentes de las muestras, se determinaron las pérdidas de peso correspondientes a los minerales presentes, obteniendo de forma cuantitativa sus contenidos.

Es posible que existan pérdidas de peso correspondientes a otros compuestos presentes en pequeña proporción y que la sensibilidad del método no aprecia.

Mineral	Región de temperatura (°C)	Tipo de reacción	Pérdida de peso (g kg ⁻¹)
Gibbsita	250	-OH, H ₂ O	312
Goethita	300-400	-OH, H ₂ O	101-112
Calcita	750-900	CO ₃ , CO ₂	440
Dolomita	500-950	CO ₃ , CO ₂	475
Magnesita	500-750	CO ₃ , CO ₂	524
Siderita	450-600	CO ₃ , CO ₂	379
Na ₂ CO ₃	500-1000	CO ₃ , CO ₂	415
Yeso	100-350	-H-OH, H ₂ O	209
Caolinita	400-600	-OH, H ₂ O	140
Halosita	400-600	-OH, H ₂ O	122
Esmectita	25-250	-H-OH, H ₂ O	228
Esmectita	600-900	-OH, H ₂ O	50
Vermiculita	600-900	-H-OH, H ₂ O	24
Talco	850-1050	-OH, H ₂ O	50
Illita	500-900	-OH, H ₂ O	50
Clorita	540-800	-OH, H ₂ O	123

Fuente: Karathanasis y Harris, 1994.

Tabla 6.3. Regiones de pérdida de peso termogravimétrica (TG) empleadas para la estimación cuantitativa de determinados minerales en el suelo

6.1.6 Análisis químico total.

Se determinó el contenido en componentes mayoritarios de las muestras mediante Fluorescencia de Rayos X, en forma de pastillas, empleando un Espectrómetro de Fluorescencia modelo MAGIXPro de Philips (Figura 6.4), con el programa semicuantitativo IQ+, previamente calibrado con materiales de referencia de matriz similar a las muestras empleadas (NIST SRM 2711 Montana Soil, NIST SRM 2709 San Joaquin Soil, NCS DC 73319, NCS DC 73320, NCS DC 73321, NCS DC 73323, NCS DC 73324, NCS DC 73325, NRC BCSS-1, NRC PACS-1).

Las muestras molidas y homogeneizadas se mezclaron en un mortero de ágata con 2 ml de aglutinante Elvacite 2044 disuelto en acetona. Las pastillas se

realizaron adicionando en una cápsula de aluminio un fondo de ácido bórico y la mezcla de la muestra con el aglutinante, y compactando posteriormente en una prensa Herzog aplicando una presión de 200 kN.

Esta técnica ha sido empleada con éxito en la determinación semicuantitativa y cuantitativa de componentes mayoritarios en muestras de suelos (Ure, 1995), sin embargo, es poco sensible para la determinación de componentes minoritarios.

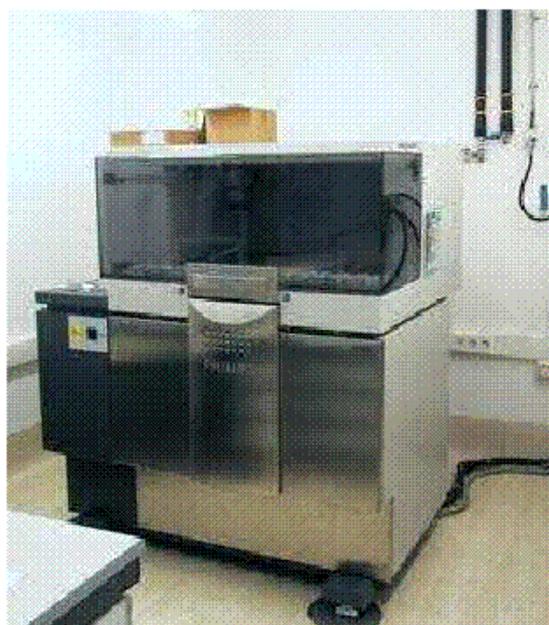


Figura 6.4. Espectrómetro de Fluorescencia de Rayos X Philips MAGIXPro

6.1.7. Determinación de elementos traza.

El estudio analítico de elementos traza comprendió los contenidos totales y una serie de extracciones simples, con el objetivo de simular diferentes situaciones medioambientales y así determinar la movilidad de estos elementos en las muestras seleccionadas.

6.1.7.1. Contenido total de elementos traza. Digestión en microondas.

Las muestras de sedimento se molieron durante 15 minutos en un molino de bolas y el polvo resultante se mantuvo en un recipiente de plástico herméticamente cerrado hasta su análisis.

Se pesaron 100 mg de muestra molida, se introdujeron en tubos de teflón y se adicionaron 5 ml de HF concentrado, 200 μ l de HNO₃ concentrado y 5 ml de agua ultrapura (MilliQ). Los tubos de teflón se introdujeron en el microondas y se sometieron a una digestión durante 15 minutos (microondas Milestone ETHOS PLUS). El programa de calentamiento del microondas consistió en una rampa de 7 minutos hasta alcanzar los 1000 W y posteriormente se mantuvieron 1000 W durante 8 minutos. Tras la digestión, las muestras se llevaron a 50 ml y se almacenaron hasta su análisis (Figura 6.5).

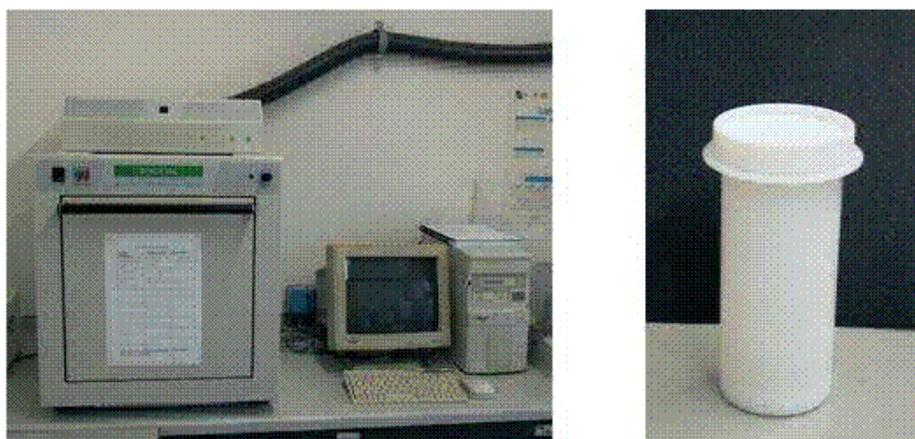


Figura 6.5. a) Microondas Milestone ETHOS PLUS, b) Tubo de teflón

6.1.7.2. Extracciones selectivas.

Extraíbles en agua.

Se determinó el contenido en elementos traza en los extractos obtenidos al filtrar la suspensión de una relación suelo:agua (1:5). Las concentraciones de elementos traza solubles en este medio son representativas de la fracción soluble

y más fácilmente movilizable en el suelo. El residuo sólido se secó para su posterior determinación mediante Difracción de Rayos X.

Extraíbles en medio ácido.

A 1 g de muestra se le añadieron 50 ml de ácido nítrico 0,1N, ajustando el pH (Vidal, 2002). En algunos casos fue necesario añadir unas gotas de ácido concentrado para alcanzar pH 1. La suspensión fue agitada durante una hora, posteriormente se centrifugó a 3000 rpm durante 20 minutos y se separó el residuo del sobrenadante. El líquido se guardó en un recipiente de plástico y el residuo se secó para su posterior determinación por Difracción de Rayos X. Con esta extracción se intentó simular la acción de aguas ácidas sobre los materiales estudiados.

Extraíbles en medio complejante-reductor.

Este método, desarrollado por Mehra y Jackson (1960), permite extraer los óxidos de hierro libres y por tanto, los elementos asociados a ellos. Sílice y alúmina son también extraídos y pueden, por tanto, ser determinados.

Se pesó aproximadamente 1 g de muestra y se adicionaron 40 ml de citrato sódico 0,3M (agente quelatante para las formas ferrosa y férrica del hierro) y 5 ml de NaHCO₃ 1N (que actúa como tampón). Se calentó la suspensión a 80 °C en un baño de agua y se añadió 1 g de ditionito sódico (agente reductor); se agitó la suspensión constantemente durante un minuto y de vez en cuando durante un total de 15 minutos. Posteriormente se centrifugó a 3000 rpm durante 10 minutos y se guardó el sobrenadante en un recipiente de plástico hasta la determinación de elementos traza. El residuo se secó y se determinó mediante Difracción de Rayos X.

Extraíbles en medio oxidante.

Esta extracción es la tercera etapa de la extracción secuencial desarrollada por el BCR (Community Bureau of Reference) para la determinación de elementos traza en suelos y sedimentos (Sutherland y Tack, 2002).

A 1 g de muestra se le añadieron 40 ml de H₂O₂ (pH 2-3) y se mantuvo a temperatura ambiente durante una hora, tras la cual la digestión continuó en un baño a 85 °C hasta que el volumen quedó reducido a unos pocos mililitros. Se volvieron a añadir 10 ml de H₂O₂ (pH 2-3) y se repitió el procedimiento anterior.

Posteriormente se adicionaron 50 ml de NH₄OAc 1M (pH 2) y se agitó durante 16 h a 22 ± 5 °C. El extracto se separó del residuo sólido por centrifugación a 3000 rpm durante 20 minutos. El líquido se guardó en un recipiente de plástico y el residuo se secó para su posterior determinación por Difracción de Rayos X.

Extraíbles en DTPA.

Se siguió el método desarrollado por Lindsay y Norvell (1978) para determinar la fracción asimilable por las plantas. Se empleó una disolución extractante 0,05N en DTPA; 0,01N en CaCl₂ y 0,1M en trietanolamina, que es empleada como reguladora a pH=7,3.

Se pesaron 5 g de muestra, se añadieron 10 ml de la disolución extractante y se agitó durante dos horas en un matraz erlenmeyer de 100 ml. Posteriormente se centrifugó a 3000 rpm durante 20 minutos y se separó el líquido del residuo.

Extraíbles en el tracto gastrointestinal.

El método consta de dos pasos: una extracción en fase gástrica que simula la bioquímica de ácidos del estómago y una posterior extracción en fase intestinal que simula la bioquímica del intestino delgado.

La fracción del contaminante que se disuelve por este procedimiento se utiliza para estimar la biodisponibilidad relativa de los contaminantes en el suelo (Naidu et al., 2008).

Con el fin de establecer la cantidad del elemento que puede llegar a ser soluble y posteriormente absorbido en el tracto gastrointestinal se ha modificado el protocolo desarrollado por el SBRC (Solubility/Bioavailability Research Consortium) para evaluar la cantidad biodisponible tras la ingestión de suelo (Kelley et al., 2002).

La extracción se realizó a partir de la fracción menor de 250 micras, ya que es este tamaño de partícula el que queda adherido a las manos.

Se pesó 1 g de muestra en una botella de plástico de 250 ml y se adicionaron 100 ml de disolución de glicina 0,4M, a pH $1,5 \pm 0,5$, ajustado con HCl concentrado.

Las suspensiones se introdujeron en un baño de agua a 37°C y se les hizo burbujear argón, con el fin de mantener unas condiciones anaerobias, y agitación constante durante el proceso, simulando así el proceso digestivo que tiene lugar en el estómago. Transcurrida una hora se detuvo la reacción, se comprobó que el pH se mantenía en $1,5 \pm 0,5$ y se extrajeron 20 ml de la suspensión con una jeringuilla, se filtraron a través de un filtro de nylon de 0,45 μm y la muestra filtrada se almacenó en un recipiente de plástico a 4 °C hasta que fue analizada.

En la segunda etapa, se elevó el pH de la suspensión existente en la botella a $7,0 \pm 0,5$ con NaOH (50% v/v) y se añadieron 175 mg de bilis, 50 mg de pancreatina y se volvió a burbujear argón, continuando la extracción durante cuatro horas más, simulando el paso a través del intestino delgado. La suspensión resultante de esta etapa se filtró y acidificó con HNO_3 y se almacenó en un recipiente de plástico a 4 °C hasta que fue analizada.

La cantidad de elemento traza soluble en cada una de estas etapas se expresó en mg kg^{-1} y como porcentaje respecto al contenido total en la fracción menor de 250 μm .

6.2. Aguas y aguas de poro.

6.2.1. Obtención del agua de poro.

El agua de poro se obtuvo mediante un proceso de centrifugación. Con este método se consigue extraer el agua presente en un suelo, saturado o parcialmente saturado, de una manera rápida y sencilla.

Una cantidad conocida de suelo se introdujo en cubetas, que fueron agitadas durante 60 minutos en una centrífuga Beckman J21C, equipada con un rotor de ángulo fijo Beckman JA-10 a una velocidad de 1500 rpm. Una vez

completada la etapa de centrifugación, se separó el agua de poro del sedimento (Di Bonito, 2005).

6.2.2. Determinaciones analíticas generales.

- El pH fue medido con un pHmetro Crison GLP21.
- La conductividad eléctrica se determinó con un conductímetro Crison GLP31 y expresada en dS m^{-1} .
- Finalmente, se determinó el potencial redox de las muestras de agua y se expresó en mV.

6.2.3. Determinación de iones solubles.

En las muestras de agua de escorrentía y aguas de poro se determinó el contenido en iones solubles (F^- , Cl^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+}) mediante cromatografía iónica, con un cromatógrafo iónico Methrom 761 Compact IC (Figure 6.6) formado por: válvula de inyección, banda de pistón doble, amortiguador de pulsaciones, cámara de columnas, columnas, supresor, bomba peristáltica y un detector.



Figura 6.6. Cromatógrafo iónico Methrom 761 Compact IC

En los extractos, una vez determinada la conductividad eléctrica, se realizaron diluciones para evitar la saturación de la columna (Tabla 6.4).

CE (dS m⁻¹)	2-6	6-15	15-25	25-50	50-100
Dilución	1:10	1:25	1:50	1:100	1:200

Tabla 6.4. Diluciones realizadas a las muestras

Para la separación de aniones, el relleno de la columna supresora es la forma ácida de una resina de intercambio catiónico, que convierte eficazmente los iones del disolvente en especies moleculares poco ionizadas, sin alterar los iones del analito.

El cromatógrafo de aniones Metrohm 761 Compact IC está dotado con la columna Metrosep A supp 1 cuyas características vienen reflejadas en la Tabla 6.5 y previa a la columna de separación Metrosep A supp 1, está dispuesta una precolumna de seguridad Metrosep A Guard.

Material de relleno	Copolímero poliestireno/divinilbenceno
Dimensiones	4,6 x 250 mm
Flujo standard	1,0 ml/min
Flujo máximo	2,5 ml/min
Presión máxima	15 MPa
Tamaño de partícula	7 µm
Rango de pH	1-13
Eluyente	Na ₂ CO ₃ 3mmol/l

Tabla 6.5. Condiciones experimentales

La inyección de las muestras se realizó mediante un automuestreador Metrohm 813 Compact Autosampler, que dispone de un carro de 36 posiciones para viales con una aguja inyectora y una bomba peristáltica que inyectó la muestra a un caudal constante de 1 ml min⁻¹.

Para el estudio de los cationes presentes en las muestras se utilizó un cromatógrafo iónico Metrohm, modelo 761 Compact IC con columna METROSEP C2 150 para cationes, cuyas características vienen reflejadas en la Tabla 6.6, y previa a la columna de separación, está dispuesta una precolumna de seguridad Metrosep C2 Guard.

Material de relleno	
Dimensiones	4,0 x 150 mm
Flujo standard	1,0 ml/min
Flujo máximo	5,0 ml/min
Presión máxima	35 MPa
Tamaño de partícula	7 µm
Rango de pH	2-7
Eluyente	Acido Tartárico 4 mmol/l Acido Dípicoínico 0,75 mmol/l

Tabla 6.6. Condiciones experimentales

Los tiempos de retención de los iones determinados vienen recogidos en la Tabla 6.7.

Aniones	Fluoruros	Cloruros	Nitritos	Nitratos	Fosfatos	Sulfatos
Tiempo (min)	3,479	6,232	6,768	10,870	14,586	21,647
Cationes	Litio	Sodio	Amonio	Potasio	Calcio	Magnesio
Tiempo (min)	4,167	5,279	6,045	8,137	14,101	18,897

Tabla 6.7. Tiempos de retención de iones (min)

6.2.4. Determinación de la especiación química en la solución acuosa.

MINTEQ es un modelo de especiación geoquímica para sistemas acuosos, que permite estimar la distribución entre fases disueltas, adsorbidas y sólidas bajo una gran variedad de condiciones, incluyendo fases gaseosas.

Los datos requeridos para predecir la composición de equilibrio consisten en un análisis químico de la muestra, incluyendo las concentraciones disueltas de los elementos y cualquier otra medida relevante para el sistema, pudiendo incluirse el pH, el potencial redox y las presiones parciales de los gases.

MINTEQ tiene una base de datos extensa, adecuada para estudiar una amplia gama de datos sin la necesidad de añadir constantes de equilibrio adicionales.

Con este programa se ha determinado:

- Especiación iónica usando constantes de equilibrio recogidas en la base de datos MINTEQ.
- Cálculos de solubilidad y de adsorción usando isoterma de adsorción.
- Equilibrio entre fases en solución, adsorbidas, gaseosas, etc.
- Índices de saturación para los distintos minerales.

6.3. Material vegetal.

Los contenidos totales de cinc, plomo, cadmio, hierro, arsénico, cobre, manganeso y mercurio en el material vegetal fueron determinados tras realizar una digestión en microondas.

Una vez liofilizado el material, 200 mg de tejido vegetal se introdujeron en tubos de teflón y se añadieron 3 ml de agua ultrapura (MilliQ), 2 ml de H₂O₂ concentrado y 5 ml de HNO₃ concentrado.

Los tubos de teflón se introdujeron en el microondas y se sometieron a una digestión durante 19 minutos (microondas Milestone ETHOS PLUS). El programa de calentamiento del microondas alcanza una potencia máxima de 450W. Tras la digestión, las muestras se llevaron a 50 ml y se almacenaron hasta su análisis.

6.4. Determinación analítica del contenido en elementos traza. Condiciones experimentales y parámetros instrumentales.

El contenido en elementos traza se determinó en las muestras de sedimentos, en las aguas y aguas de poro y en las muestras de material vegetal.

6.4.1. Determinación analítica del contenido total de Zn, Pb, Fe, Cd, Cu y Mn.

Para determinar los contenidos de Zn, Pb, Cd, Fe, Cu y Mn se emplearon las técnicas de espectrometría de absorción atómica mediante atomización con llama (Perkin-Elmer 1100B Flame Atomic Absorption Spectrophotometer) y espectrometría de absorción atómica mediante atomización electrotérmica (Unicam 929 AASpectrometer) cuando el analito se encontraba a nivel de traza, ya que emplea un sistema de atomización más eficaz (Figura 6.7).

En la determinación del contenido de estos metales pesados se emplearon distintos materiales de referencia: NIST SRM 2711 Montana Soil, NIST SRM 2709 San Joaquin Soil, NCS DC 73319, NCS DC 73320, NCS DC 73321, NCS DC 73323, NCS DC 73324, NCS DC 73325.

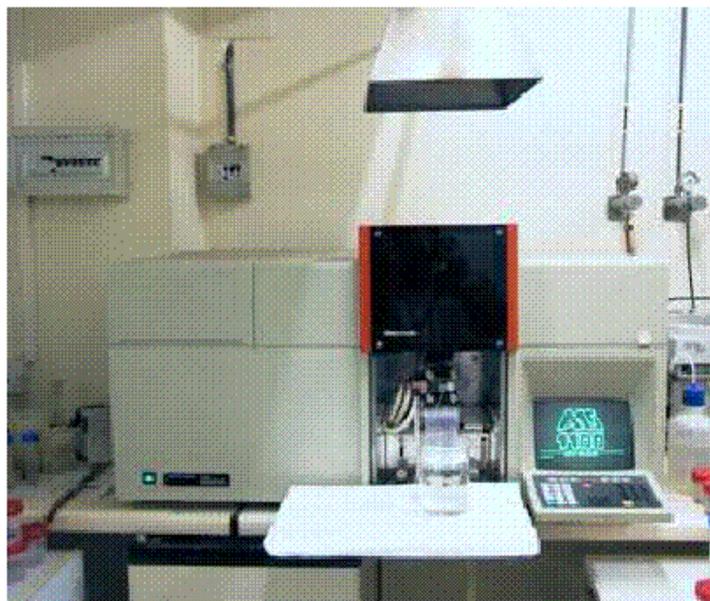


Figura 6.7. a) Espectrómetro Perkin-Elmer 1100B, b) Espectrómetro Unicam 929.

Las Tablas 6.8, 6.9 y 6.10 muestran las condiciones experimentales y parámetros instrumentales para las muestras analizadas mediante FAAS y ETAAS.

Parámetro y/o condición	Zn	Cd	Pb	Fe	Cu	Mn
Longitud de onda (nm)	213,9	228,8	217,0	248,3	324,8	279,5
Anchura de rendija (nm)	0,7	0,7	0,7	0,2	0,7	0,2
Calibración (mg l ⁻¹)	0,5-2	0,5-2	5-20	1-5	1-5	1-5
Caudal Aire-Acetileno	7,9-1,2	5,4-1,9	5,4-1,9	6,3-1,8	6,3-1,3	8,0-2,5

Tabla 6.8. Condiciones experimentales y parámetros instrumentales para las muestras analizadas mediante FAAS

Parámetro y/o condición	Cd	Pb	Cu
Longitud de onda (nm)	228,8	217,0	324,8
Anchura de rendija (nm)	0,5	0,5	0,5
Corrección de fondo	D2	D2	D2
Atomizador	Plataforma	Plataforma	Pared
Volumen de inyección (µl)	10	10	10
Calibración (µg l ⁻¹)	0,5-3	10-100	10-100

Tabla 6.9 Condiciones experimentales y parámetros instrumentales para las muestras analizadas mediante ETAAS

	Etapas	Temperatura (°C)	Rampa (°C s ⁻¹)	Tiempo mantenido (s)
Cd	1	300	20	15
	2	1700	0	4
	3	2700	0	3
Pb	1	200	20	10
	2	600	20	15
	3	1800	0	4
	4	2700	0	3
Cu	1	400	20	8
	2	600	20	15
	3	2100	0	3
	4	2300	0	3

Tabla 6.10 Programa de calentamiento para Cd, Pb y Cu en ETAAS

6.4.2. Determinación analítica del contenido de Al.

Para determinar el contenido en aluminio de las muestras de agua y aguas de poro se empleó la técnica de espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS).

En la determinación del contenido en aluminio se emplearon distintos materiales de referencia: NIST SRM 2711 Montana Soil, NIST SRM 2709 San Joaquin Soil, NCS DC 73319, NCS DC 73320, NCS DC 73321, NCS DC 73323, NCS DC 73324, NCS DC 73325.

6.4.3. Determinación analítica del contenido total de As y Hg.

El contenido en arsénico fue determinado mediante Espectrometría de Fluorescencia Atómica con generación de hidruros (GH-AFS) empleando un equipo PSA Millenium Excalibur 10055. Las muestras fueron preparadas en HCl al 30% y I-AA (ácido ascórbico $C_6H_8O_6$) al 2%. Se empleó, $NaBH_4$ 0,7% (m/v) en 0,1M de NaOH, como reductor y argón como gas portador (Figura 6.8).

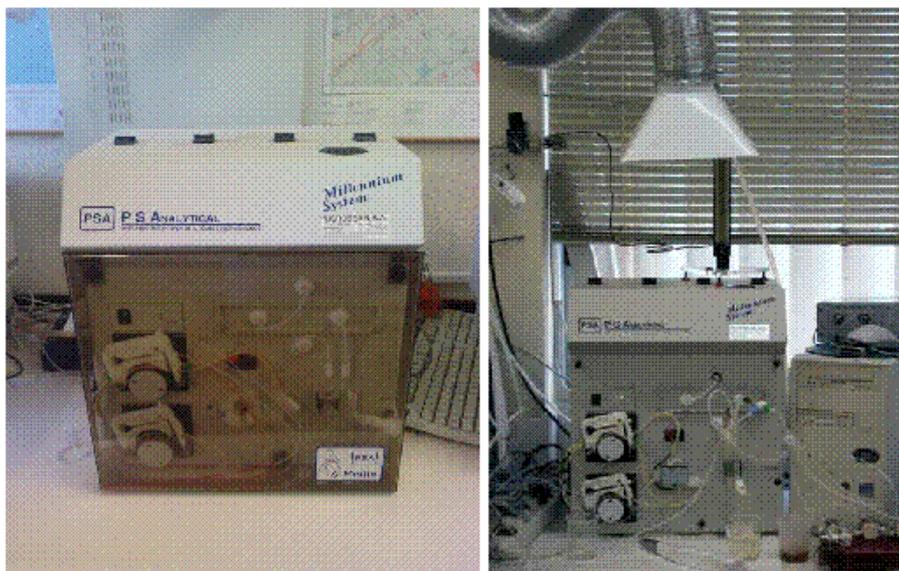


Figura 6.8. Equipo para GH-AFS, PSA Millenium Merlin 10025 (izq) y PSA Millenium Excalibur 10055 (dcha)

El contenido en mercurio fue determinado también mediante Espectrometría de Fluorescencia Atómica con generación de hidruros (GH-AFS) empleando un equipo PSA Millenium Merlin 10025. Las muestras fueron preparadas en HCl al 33% y KBrO_3/KBr 0,1N y cloruro de hidroxilamina (OHNH_2Cl) al 12% (m/v). Como gas portador se empleó argón y SnCl_2 como reductor. En la determinación del contenido total de arsénico y mercurio se emplearon distintos materiales de referencia: NIST SRM 2711 Montana Soil, NIST SRM 2709 San Joaquin Soil, NCS DC 73319, NCS DC 73320, NCS DC 73321, NCS DC 73323, NCS DC 73324, NCS DC 73325.

La Tabla 6.11 muestra las condiciones experimentales y parámetros instrumentales para las muestras analizadas mediante GH-AFS:

	As	Hg
Longitud de onda (nm)	197,3	254
Volumen de inyección (ml)	2	8
Tiempo de espera (s)	15	15
Tiempo de medida (s)	30	40
Tiempo de memoria (s)	30	60
Modo de medida	Área de pico	Área de pico
Flujo Ar (ml min^{-1})	300	300
Calibración ($\mu\text{g l}^{-1}$)	50-300	2-10

Tabla 6.11. Condiciones experimentales y parámetros instrumentales para la determinación de As y Hg (GH-AFS)

6.5. Ensayos de toxicidad.

La determinación de la concentración de un contaminante no es suficiente en la evaluación de los efectos tóxicos o en la caracterización de emplazamientos contaminados (García-Lorenzo et al., 2009). Para estimar el riesgo de los contaminantes, además de emplear métodos químicos, éstos deben ser complementados con métodos biológicos (Leitgib et al., 2007). Los bioensayos de ecotoxicidad miden la biodisponibilidad de los contaminantes (Gruiz, 2005) constituyendo una herramienta para determinar la toxicidad de una muestra como complemento de los análisis químicos (Wilke et al., 2007).

6.5.1. Bioensayo Microtox®.

Actualmente se emplean gran cantidad de bioensayos, pero la necesidad de métodos rápidos y con buena relación coste-efectividad implica que los más empleados sean los basados en microorganismos. De entre ellos, las bacterias desempeñan un papel importante en el ciclo de nutrientes, descomposición de la materia orgánica y en el destino de los contaminantes en muestras de agua (Ocampo-Duque et al., 2008).

Los ensayos en bacterias y otros microorganismos tienen la ventaja de que presentan rutas bioquímicas similares a las de los organismos superiores, ciclos de vida cortos y además responden rápidamente a los cambios en el medio ambiente.

El test de inhibición de luminiscencia de la bacteria marina *Vibrio fischeri* es uno de los más empleados, ya que abarca un amplio espectro de sustancias, así como presenta buena correlación con otros métodos de determinación de la toxicidad aguda (Parvez et al., 2006; Pérez-Sirvent et al., 2007).

Este método puede emplearse tanto en muestras sólidas como acuosas con el fin de (García Lorenzo, 2004; Volpi Ghirardini et al., 2009):

- Evaluar la toxicidad de compuestos puros.
- Monitorizar aguas superficiales o aguas residuales.
- Controlar la calidad de flujos de agua en plantas de tratamiento de agua.
- Evaluar la toxicidad de muestras sólidas (suelos o sedimentos) o sus extractos líquidos.
- Estudiar la toxicidad de sustancias liberadas durante la degradación de materiales.
- Controlar acciones de remediación en suelos o sedimentos.

El bioensayo bacteriano Microtox®, diseñado por Strategic Diagnostic Inc. (Azur Environmental, 1998) se basa en determinar los cambios en la emisión de luz natural de la bacteria luminiscente *Vibrio fischeri* (*Photobacterium phosphoreum*, NRRL B-11177). *Vibrio fischeri* es una bacteria gram negativa,

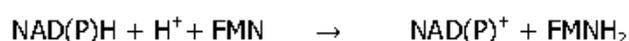
anaerobia facultativa, de la familia *Vibrionaceae* cuya característica más representativa es la bioluminiscencia. Es importante destacar la estabilidad en la emisión de luz así como la gran sensibilidad que presenta a una amplia variedad de sustancias tóxicas (García Lorenzo, 2004).

Las reacciones de emisión de luz en la mayoría de las bacterias involucran la oxidación de riboflavin fosfato reducido (FMNH₂) con emisión de luz verde-azulada, $\lambda_{\text{max}} = 490\text{-}505\text{ nm}$ (Lin et al., 1993). La reacción en conjunto se muestra a continuación:



Dicha reacción está catalizada por la enzima luciferasa bacteriana, una heterodimérica ($\alpha\beta$) flavin monooxigenasa.

El flavin mononucleótido, FMN, junto con el flavin adenin dinucleótido, FAD, son los dos coenzimas que se derivan de la riboflavina (vitamina B2). En una bacteria luminosa, la forma reducida de FMN (FMNH₂) es un componente esencial de la reacción de luminiscencia y FMNH₂ puede ser suministrada por NAD(P)H y FMN mediante la siguiente reacción enzimática (Inouye, 1994), catalizada por flavin reductasa.



La reacción de bioluminiscencia bacteriana está ligada al sistema de transporte de electrones en la respiración celular y es indicativa del estado metabólico de la célula, de modo que una disminución de la bioluminiscencia indica la disminución de la respiración celular.

Los contaminantes físicos, químicos y biológicos afectan a la respiración celular, alterando el porcentaje de síntesis de proteínas y lípidos y modificando por tanto el nivel de emisión de luminiscencia (Devesa-Rey et al., 2008; García Lorenzo, 2004).

En presencia de agentes contaminantes, la bioluminiscencia natural de *Vibrio fischeri* disminuye y la toxicidad se expresa como concentración efectiva 50 (CE₅₀): concentración del agente contaminante que produce una reducción del

50% en la emisión de luz inicial (Martínez-Sánchez et al., 2008e; Pérez-Sirvent et al., 2007).

El ensayo se llevó a cabo en las muestras de agua de escorrentía y en las aguas de poro. Se utilizaron viales de *Vibrio fischeri* liofilizada que deben conservarse a -20°C. Antes de ser reconstituidas se recomienda trasladar las bacterias a un frigorífico a una temperatura entre 2 y 8 °C, para evitar el cambio brusco de temperatura. Las bacterias fueron resuspendidas con una solución al 2% de NaCl a 15 °C hasta alcanzar una emisión de luz de 2000 RLU por alícuota de 100 µl. Las muestras fueron saladas con NaCl al 2% para evitar efectos osmóticos y se incubaron a 15 °C durante 15 minutos.

Para la preparación de las muestras se realizaron series de diluciones hasta completar un máximo de cuatro diluciones con un factor de dilución de dos, antes de adicionar a cada cubeta 10 µl de bacterias reconstituidas. Tras la incubación de 15 min a 15 °C se determinó el valor de emisión de luz, expresando el resultado mediante el parámetro CE_{50} , es decir, dilución de la muestra que en contacto con la bacteria reduce su emisión de luz al 50%, lo que corresponde a una inhibición del metabolismo.

Para comprobar la validez de los resultados, se empleó un patrón de $ZnSO_4$, cuyo valor de CE_{50} es conocido.

6.5.2. Bioensayo Phytotoxkit®.

El ensayo de toxicidad Phytotoxkit® (Phytotoxkit, 2004) establece la disminución en la germinación de semillas y en el crecimiento de la raíz tras la exposición durante 3 días de semillas de tres especies de plantas superiores en contacto con suelos contaminados y con un suelo de referencia que actúa como control (Oleszczuk, 2007). La OECD recomienda en los ensayos de fitotoxicidad se haga uso de una monocotiledónea y una dicotiledónea (OECD, 1984). Las especies seleccionadas para este bioensayo fueron: la monocotiledónea *Sorghum saccharatum* (Sorgo) y las dicotiledóneas *Lepidium sativum* (Mastuerzo) y *Sinapis alba* (Mostaza blanca) (Figura 6.11). Las tres especies son frecuentemente utilizadas en bioensayos de toxicidad con plantas, ya que su germinación y crecimiento es muy rápido, lo que permite obtener resultados en pocos días.

Este ensayo se llevó a cabo en los sedimentos recogidos, y para su realización se emplean recipientes transparentes de plástico divididos en 2 compartimentos. En el compartimento inferior se coloca el sedimento/suelo a evaluar llevado a su capacidad de saturación en agua y sobre él, un papel de filtro, donde se colocan 10 semillas de la especie seleccionada, separadas por distancias similares y ubicadas cerca del borde superior del compartimento.

Una vez preparada la muestra, se colocan los envases en vertical y se incuban a 25 °C durante tres días en ausencia de luz. Transcurrido este periodo, se toman fotografías de las plantas germinadas y se analiza el porcentaje de inhibición en la germinación y en el crecimiento de las semillas. El análisis de la imagen se realizó con el programa Image Tool 3.0 para Windows. Ya que el análisis se realiza por triplicado, los resultados obtenidos representan el valor medio de estas observaciones.

Con los resultados obtenidos se establece el porcentaje de inhibición (IG) de la germinación y la inhibición en el crecimiento de las raíces (IR) para cada especie con la fórmula siguiente:

$$IG/IR = (A-B/A) \times 100$$

Siendo A la germinación media de las semillas o el crecimiento medio de las raíces en el suelo que actúa de control y B la germinación media o el crecimiento medio de las raíces en el sedimento/suelo evaluado.



Figura 6.11. Bioensayo Phytotoxkit®

6.5.3. Bioensayo Ostracodtoxkit®.

La toxicidad de las muestras de sedimentos/suelos también se evaluó con el bioensayo de contacto Ostracodtoxkit® (Chial Belgis et al., 2003). Este ensayo emplea huevos del crustáceo bentónico *Heterocypris incongruens*. En este ensayo se pone en contacto durante 6 días el sedimento/suelo a evaluar con ejemplares del crustáceo eclosionados.

Tras los 6 días, se compara el porcentaje de mortalidad y el porcentaje de inhibición en el crecimiento con los resultados obtenidos con un sedimento arenoso de referencia.

Para la realización de este bioensayo, los huevos de *Heterocypris incongruens* se colocaron en una placa Petri con 10 ml de agua dulce estándar y se incubaron a 25 °C con iluminación permanente (aproximadamente 3000-4000 lux) durante 48 horas. Transcurridas estas horas se añadió spirulina y se dejó incubar durante 4 horas más. Posteriormente se trasladaron los ejemplares del crustáceo en placas con pocillos (10 organismos en cada pocillo por 6 réplicas de cada muestra) y se adicionaron 2 ml de agua dulce estándar, 1 g de muestra del sedimento a evaluar y 2 ml de una suspensión de algas para alimentar a los organismos (*Selenastrum capricornutum*). Transcurrido el periodo de incubación (6 días a 25 °C y en ausencia de luz), se determinó la mortalidad de los organismos. En primer lugar se hizo un recuento de los organismos vivos para establecer el porcentaje de mortalidad y posteriormente se midió la longitud de los organismos vivos con la ayuda de una lupa y un micrómetro, si la mortalidad era inferior al 40% (Ostracodtoxkit® FTM, 2001). El porcentaje de inhibición del crecimiento (IC) en *H. incongruens* se calculó con la siguiente fórmula:

$$IC= 100- (A/B \times 100)$$

Siendo A el incremento de crecimiento en los ostracodos en contacto con el suelo de referencia y B el incremento de crecimiento de los ostracodos en el sedimento a evaluar.

6.6. Análisis estadístico.

El análisis estadístico de los datos obtenidos incluyó diferentes tratamientos que se pueden agrupar en:

- Estadística descriptiva.
- Técnicas para estudiar relaciones entre variables.

Para la realización de los análisis estadísticos se han utilizado los programas SYSTAT v. 12 y Minitab v.15.

6.6.1. Análisis univariante.

Los parámetros principales de estadística descriptiva, como media, desviación estándar, coeficiente de variación, máximo y mínimo, se utilizaron para caracterizar las propiedades de los sedimentos y los contenidos de elementos traza en suelos/sedimentos, aguas y muestras vegetales. Los resultados se presentan resumidos en tablas y permiten conocer los valores medios, así como la variabilidad de los parámetros analizados.

6.6.2. Análisis multivariante.

6.6.2.1. Análisis de correlaciones.

Las correlaciones permitieron establecer las relaciones lineales entre diferentes parámetros. No obstante, si entre las variables existía algún tipo de correlación no lineal no se puede detectar mediante este análisis. Las correlaciones se establecieron mediante el cálculo de los coeficientes de correlación, en este caso se seleccionó el coeficiente de Pearson.

En el espacio definido por las variables, los coeficientes de correlación lineal de Pearson o correlaciones bivariadas son útiles para agrupar variables porque indican asociación, semejanza o similitud entre ellas (Ramis y García, 2001).

Dichos coeficientes toman valores entre -1 y +1, señalando perfiles opuestos o similares, por lo que resulta más fácil interpretar las relaciones entre variables. Valores alejados de -1 y +1, no necesariamente próximos a cero, indican variables no correlacionadas. Al realizar la matriz de correlación, se consideraron dos niveles de significación (95% y 99%).

6.6.2.2. Análisis de componentes principales.

El Análisis de Componentes Principales (ACP) es una técnica estadística de síntesis de la información o reducción de la dimensión (número de variables).

Es decir, ante un banco de datos con muchas variables, el objetivo será reducirlas a un menor número, perdiendo la menor cantidad de información posible. Los nuevos componentes principales o factores serán una combinación lineal de las variables originales, y además serán independientes entre sí (Albanese et al., 2007).

Las fases de un análisis de componentes principales son las siguientes:

- Análisis de la matriz de correlaciones.
- Selección de los factores.
- Análisis de la matriz factorial.
- Interpretación de los factores.
- Cálculo de las puntuaciones factoriales.

Una vez completado el análisis de componentes principales, se realizó una rotación de factores empleando el criterio de rotación ortogonal Varimax que maximiza la varianza de las cargas para cada componente (Albanese et al., 2007), facilitando la interpretación de las correlaciones variable-factor.

Para la selección del número óptimo de factores el criterio seguido se ha basado en el porcentaje satisfactorio de varianza explicada acumulada (Peña, 2002), tomando en nuestro caso el número de factores que explican más del 70% de la varianza acumulada.

La interpretación de este análisis comprende la obtención de las puntuaciones factoriales para cada uno de los sujetos en los factores que han resultado significativos y la proyección de las mismas, o lo que es lo mismo, los gráficos de puntuaciones.

6.7. Metodología SIG.

El empleo de Sistemas de Información Geográfica (SIG) aplicados a la evaluación medioambiental de suelos es un instrumento fundamental en la gestión de este recurso, facilitando el análisis de los datos (Molina Ruiz, 2000).

Esta memoria de Tesis Doctoral ha precisado la elaboración de cartografía temática, específica, de elaboración propia, partiendo de diversas bases de datos (Figura 6.12).

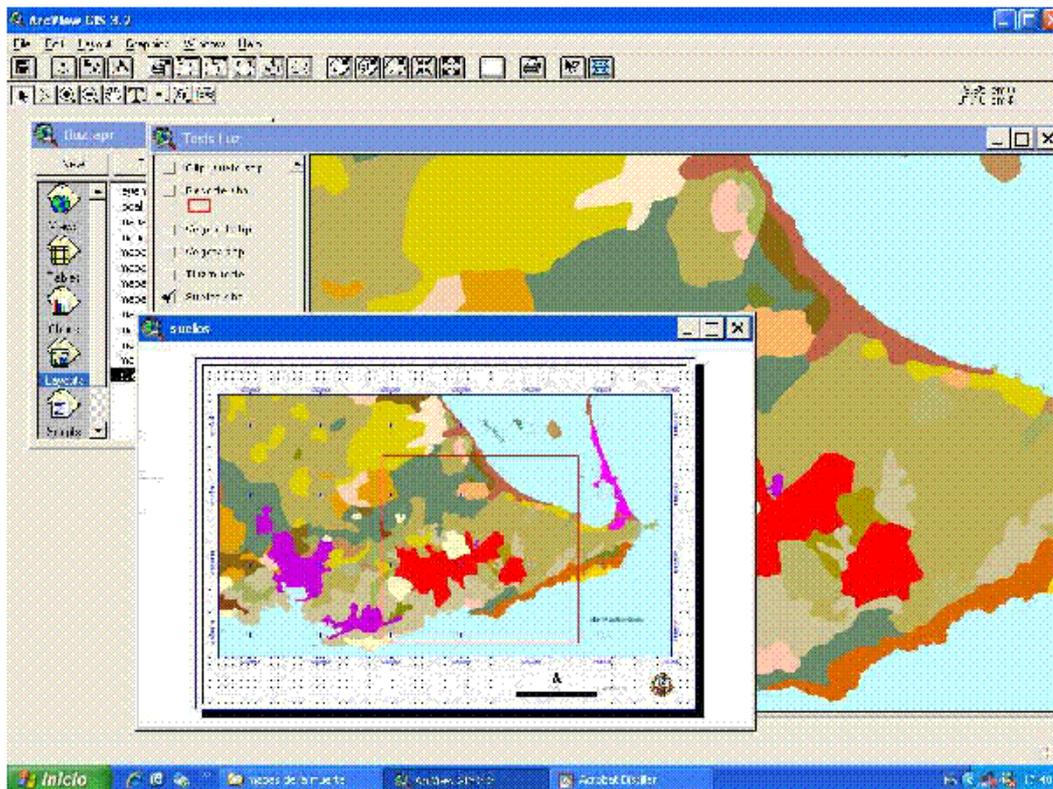


Figura 6.12. Detalle de la elaboración de la cartografía con ArcGIS 9.3

La realización de este trabajo precisó la restitución de la red hidrográfica y para ello, se aplicó un Sistema de Información Geográfica, alimentado por una base de datos georreferenciados, tratados y representados en forma digital.

Se diseñaron distintas salidas de campo para comprobar sobre el terreno el estado actual de la red hidrográfica y las cuencas vertientes de la zona de estudio.

Se partió de una base de datos CAD existente, posteriormente se tomaron puntos de referencia sobre el terreno utilizando Geoexplorer 3 como receptor y colector de datos GPS. Finalmente, se realizaron las correcciones utilizando AutoCAD 2006 (AutoCAD, 2006). Para verificar la exactitud de los datos obtenidos se trasladó la base de datos vectorial de la red de drenaje corregida a ArcGIS 9.3 (ESRI, 2007) donde se superpuso a la imagen de la serie Quickbird (CARM, 2004) para hacer las modificaciones necesarias y verificar su exactitud (Figura 6.13).

El análisis de las bases de datos ofrecerá una información clave para el análisis espacial y territorial de la zona de estudio, obteniendo una documentación precisa sobre la situación actual de la red de drenaje.

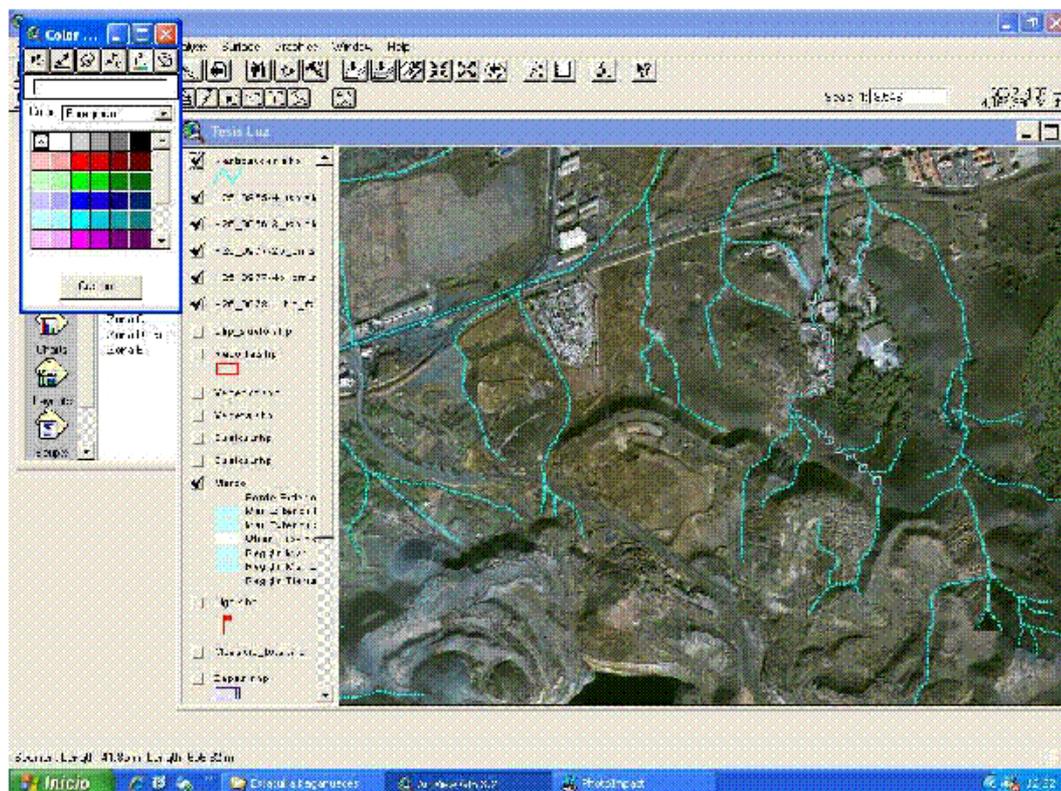


Figura 6.13. Detalle de la restitución de la red hidrográfica con ArcGis 9.3



7. PROCESOS DE METEORIZACIÓN, TRANSPORTE Y SEDIMENTACIÓN

7.1. Procesos de meteorización, transporte y sedimentación en materiales con alto contenido en elementos traza en el área de la Sierra Minera y su zona de influencia.

Existen materiales en la Sierra Minera que son susceptibles de provocar contaminación por elementos traza en suelos y aguas, en diferente grado y extensión, a tres niveles (Martínez-Sánchez et al., 2008b y 2008c; Navarro Hervás, 2004):

- Contaminación primaria: a través de los residuos existentes, que se produjeron durante la extracción, molienda y fundición del mineral, depositados en escombreras y balsas de estériles.
- Contaminación secundaria: cuando estos materiales son transportados por vía eólica e hídrica *in situ* y en zonas próximas.
- Contaminación terciaria: movilización de elementos traza (en forma soluble o particulada) que puede llegar a varios kilómetros de distancia.

Los materiales superficiales, afectados por una contaminación primaria fundamentalmente, están sufriendo un proceso de meteorización que da lugar a una serie de productos, resultantes de la alteración supergénica final, entre otros, óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso, carbonatos, sulfatos hidratados y jarositas. Los procesos de oxidación-reducción, disolución y evaporación son los más influyentes en la movilización y dispersión actual de los elementos traza.

Durante el proceso de transporte y sedimentación adquieren importancia las reacciones de adsorción, complejación y neutralización (Figura 7.1). Todas ellas actúan condicionando el proceso de atenuación natural de la contaminación. Los agentes de adsorción-desorción son arcillas y oxihidróxidos de hierro y manganeso, los de complejación son cloruros e hidróxidos y los de neutralización, carbonatos, existentes en los materiales por donde discurren las ramblas, es decir, en las zonas aluviales colindantes a la Sierra Minera.

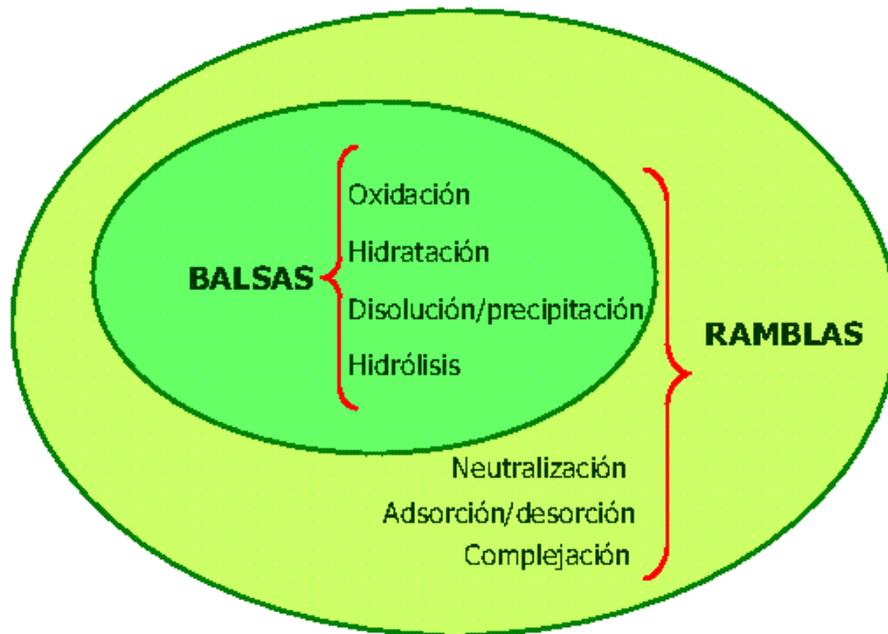


Figura 7.1. Resumen de los procesos que tienen lugar en la zona de estudio

Los materiales presentes en la Sierra Minera son una consecuencia de las circunstancias que han acompañado a la explotación minera y que condicionan los procesos de meteorización que provocan los agentes meteorológicos. Los más reactivos son el resultado de la mezcla y sedimentación de materiales en los que aparecen restos del tratamiento mecánico y metalúrgico de las menas beneficiadas, constituidos por roca encajante no alterada, roca encajante alterada, mineralización primaria, mineralización secundaria y productos de la alteración supergénica de los sulfuros.

Concretamente, las balsas de estériles de flotación son las que presentan mayor reactividad, debido a su composición química y mineralógica, pero sobre todo, a su composición granulométrica muy fina.

7.1.1. Procesos de meteorización.

La meteorización constituye el conjunto de transformaciones que experimentan rocas y minerales en la superficie terrestre como respuesta a un cambio en las condiciones ambientales respecto a las que existían en su formación.

Las asociaciones minerales formadas en condiciones de presión y temperatura muy distintas de las actuales sufren una serie compleja de procesos de alteración que tienden a dar fases en equilibrio con el medio (Sposito, 2008).

Los mecanismos de meteorización primaria, desagregación física, comprenden diversos procesos que provocan la fractura mecánica de la roca, como termoclastia, haloclastia, crioclastia, fuerzas biomecánicas, etc. Todo ello favorece los posteriores procesos de alteración química que producirán con el tiempo modificaciones en las propiedades químicas y mineralógicas de las mismas (Figura 7.2), y que serán tanto más importantes cuanto menor sea el tamaño de grano del material.

La destrucción de la red cristalina se produce por procesos de hidratación, hidrólisis y reacciones redox, activados por el aporte de agua, por la presencia de protones, el aumento en la superficie libre, las condiciones redox y los agentes de lavado. La intensidad con que se produce la meteorización de un mineral depende de su composición química, tamaño de cristal, forma y perfección cristalina (Sposito, 2008). La naturaleza y velocidad de meteorización vienen condicionados por la interacción de varios factores locales como el clima, tipo de roca, topografía, orientación y tiempo (Rajamani et al., 2009).

Las reacciones de meteorización más importantes que van a dar lugar a la movilización de elementos traza y que tienen lugar en las escombreras y las balsas de la zona de estudio debido a la existencia de sulfuros (blenda-pirita-galena), son las de oxidación-reducción, hidratación, hidrólisis y disolución-precipitación.

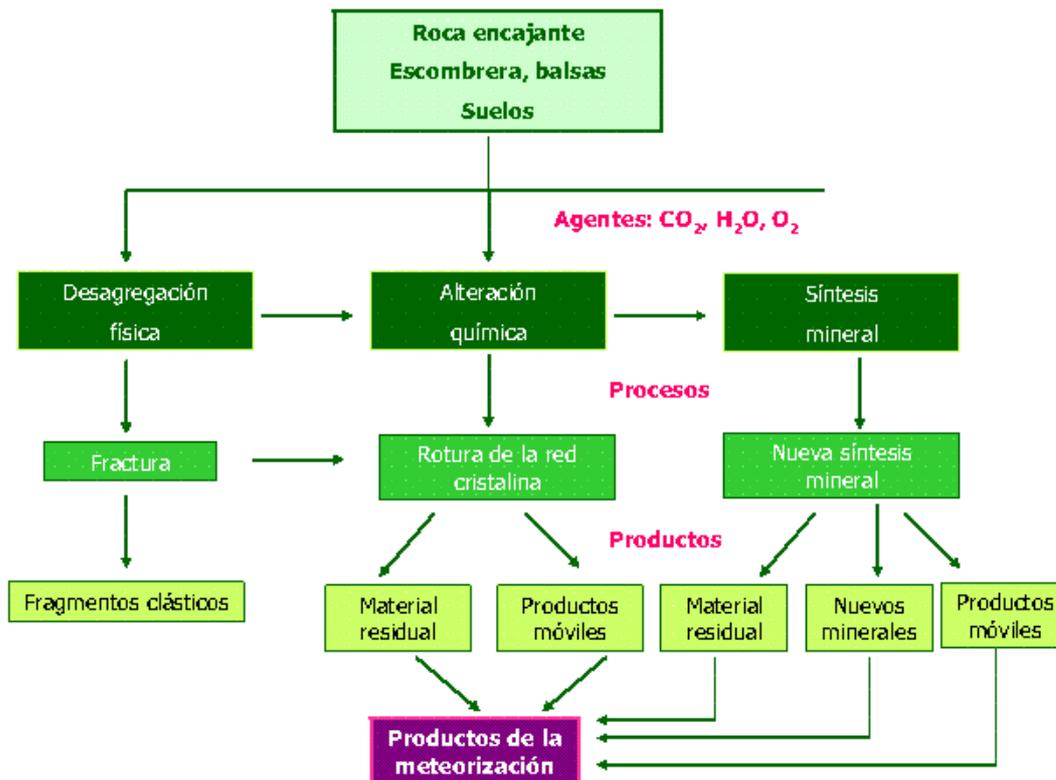


Figura 7.2. Esquema del proceso de meteorización en la Sierra Minera

7.1.2. Procesos de erosión y transporte.

La intensa actividad extractiva ha producido cambios bruscos en la morfología de la Sierra Minera, provocando variaciones en la red de drenaje, con modificación de las pendientes naturales del terreno. Los cambios de nivel de base tan abruptos producen fenómenos de erosión remontante, a través de barrancos que erosionan los taludes de las escombreras y balsas, buscando su equilibrio. El suelo, despojado de su vegetación natural, pierde su estructura y aumenta su susceptibilidad a la erosión hídrica.

El clima de la zona se caracteriza por un régimen de lluvias escaso y torrencial, con riadas importantes, sobrepasando los volúmenes de precipitación en la cuenca de las ramblas, en ocasiones, los 100 mm/h, por lo que los procesos de erosión y transporte del material son muy importantes en estos periodos.

La erosión es un fenómeno complejo de degradación física del suelo, por el que los horizontes más superficiales, ya desagregados, sufren una pérdida de

partículas, que se desplazan hacia cotas inferiores. Las formas de erosión predominantes son: cárcavas, surcos y piping o sumideros (Figura 7.3).

Todo ello está favorecido por las reacciones de disolución e hidratación, muy importantes en algunas zonas, que causan incluso deslizamientos en masa.



Figura 7.3. Erosión intensa en la zona de estudio

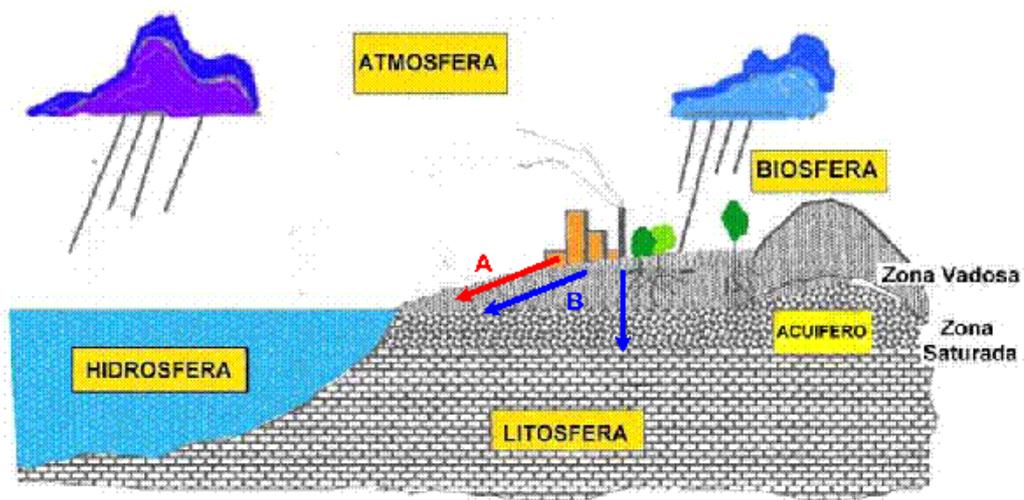
Tanto las zonas de balsas como las escombreras, suelen estar desprovistas de vegetación debido a la acidez del medio, a la textura, y sobre todo a las fuertes pendientes de sus taludes. Su erosión dependerá de diversos factores como la granulometría, naturaleza del material y el grado de compactación.

Los propios agentes meteorizantes, el agua, el viento, y los seres vivos, actúan como agentes erosivos, conduciendo a una pérdida del suelo (Torri y Borselli, 2000) y al transporte de los elementos traza (Figura 7.4) (Pierzynski et al., 2000).



Figura 7.4. Erosión de escombreras por acción del agua.

El material puede ser transportado en superficie y a través del suelo y de las aguas subterráneas cuando se producen infiltraciones (Figura 7.5).



A: Escorrentía B: Lavado lateral y descendente

Figura 7.5. Esquema del transporte de los materiales.

El transporte de los productos de la erosión en superficie por la acción del agua (Figura 7.6) se puede dar de distintas formas (Pérez-Sirvent et al., 1999):

- Como carga disuelta, procedente de sedimentos que contienen minerales solubles.
- En forma particulada, a partir de material suspendido.
- Como carga de fondo, arrastrados en el fondo de la corriente.



Figura 7.6. Charcos tras un episodio de lluvia en la zona

Este transporte dependerá de la velocidad del flujo del agua. Podemos distinguir:

- Transporte de flujo rápido, que arrastra a mayor distancia y lleva a las ramblas formas solubles y particuladas, similares a las existentes en el lugar de origen, de tamaño más grueso, y,
- Transporte de flujo lento, que para material de escombrera, dará lugar a la formación de charcos con partículas en suspensión, arcillas y limos que sedimentan y sobre las que se puedan dar nuevos fenómenos de alteración.

Los fenómenos de erosión, dispersión hídrica y eólica en las zonas mineras son mayores en los suelos formados en zonas de ladera de fuerte pendiente y balsas de estériles, con textura muy fina y sin compactación que en aquellos que presentan una textura más gruesa, aunque existe en este caso la posibilidad de generación de lixiviados ácidos.

Algunos de estos suelos desarrollados sobre las escombreras más antiguas han evolucionado y actualmente se encuentran estabilizados con vegetación natural.

En algunas zonas, las aguas de escorrentía se acumulan en balsas de lodos situadas en zonas topográficamente más bajas y presentan una coloración rojiza debido al elevado contenido en minerales férricos.

De estas aguas, por rápida evaporación, precipitan diferentes sales, lo que da lugar a la aparición de anillos concéntricos de sales desde los márgenes hacia el interior de las balsas, en función del producto de solubilidad (Figura 7.7).



Figura 7.7. Precipitados formados al evaporar el agua en una balsa de estériles

Los materiales que se han formado por alteración supergénica en la Sierra Minera y sus zonas de influencia, como sulfatos no solubles (anglesita, jarosita, alunita), óxidos y oxihidróxidos y minerales de la arcilla, como caolinita y clorita, son transportados a la vez que las formas solubles.

Además se incorporan a esta fase materiales que no han sufrido alteración, como fragmentos de la roca inalterada, minerales resistentes de ésta y sulfuros.

7.1.3. Procesos de sedimentación.

Cuando la energía cinética del sistema transportado disminuye, se produce la sedimentación de los materiales. Tanto las partículas suspendidas como las disueltas que arrastra el agua, cualquiera que sea su procedencia, sedimentan, teniendo lugar reacciones químicas heterogéneas, así como fenómenos de coagulación y floculación de partículas.

En las zonas de influencia de la Sierra Minera, existen suelos calizos (Xerosoles cálcicos y petrocálcicos fundamentalmente), de gran tradición agrícola, con cultivos hortícolas a cielo abierto y en invernaderos. Parte de estos suelos están situados en el área de inundación de las ramblas y reciben grandes aportes procedentes de flujos laterales de materiales pertenecientes a zonas mineras, de modo que son receptores de las fuentes contaminantes.

Además, existen otros receptores, las zonas urbanas. En su actividad diaria la especie humana se expone a sustancias contaminantes de diversa procedencia, siendo el suelo una fuente adicional de contaminación y medio de exposición. La ingestión de polvo/suelo es una ruta de exposición a contaminantes ambientales muy importante, sobre todo en el caso de la población infantil.

En la Figura 7.8 se resumen las principales reacciones que se dan en los procesos de alteración, transporte y sedimentación, así como algunos de los minerales resultantes.

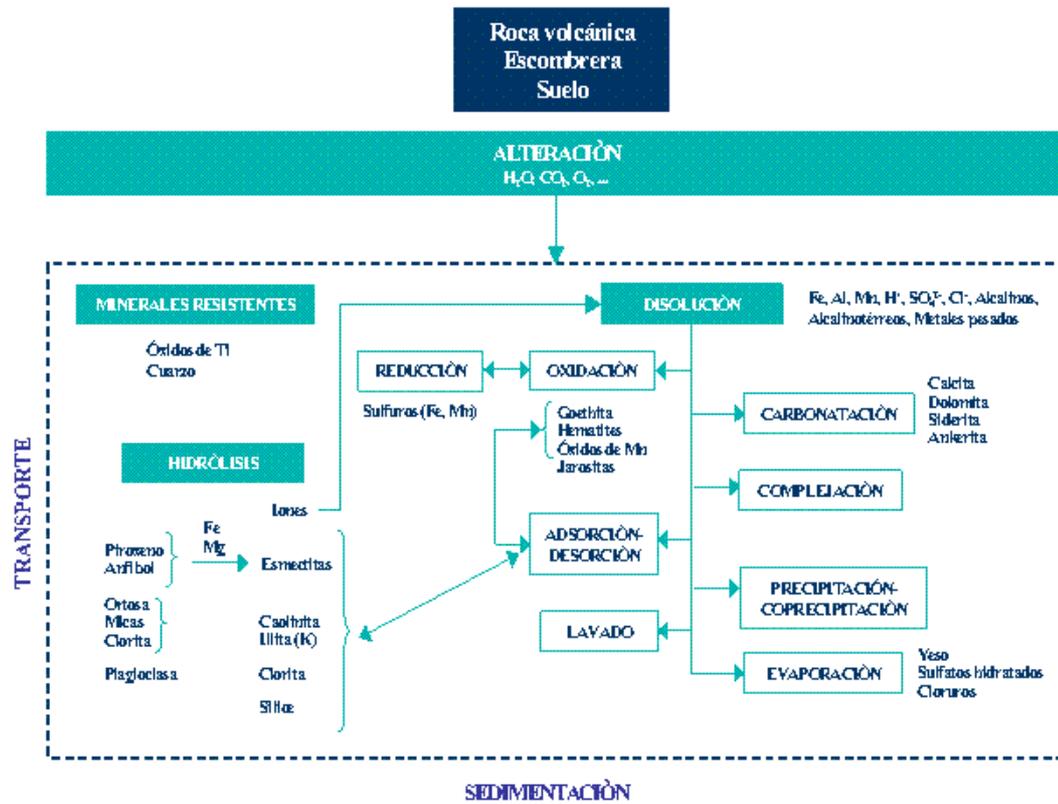


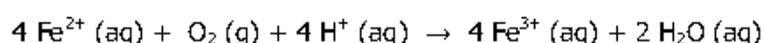
Figura 7.8. Procesos de alteración, transporte y sedimentación que se dan en las Zonas Mineras y sus áreas de influencia (Navarro Hervás, 2004)

7.2. Reacciones y productos.

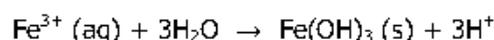
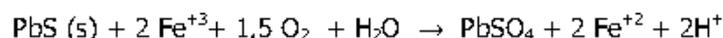
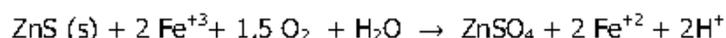
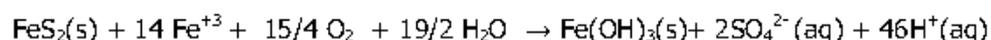
7.2.1. Reacciones y productos de la oxidación.

En nuestra zona de estudio, las reacciones más importantes para la movilización de los elementos traza son las que envuelven la oxidación de pirita, blenda y galena, debido a la inestabilidad de estas fases cuando se encuentran en un medio oxidante y ácido, aumentando la acidez (Gleisner et al., 2006) y produciéndose la formación de productos en los depósitos procedentes de la actividad minera (Kohfahl et al., 2008). Además, constituye una fuente de contaminación de elementos traza que puede afectar tanto a las aguas superficiales como a las subterráneas (Concas et al., 2006).

En este proceso pueden darse reacciones biogeoquímicas por bacterias como *Thiobacillus ferrooxidans* y *Thiobacillus thiooxidans* (Xu et al., 2008).

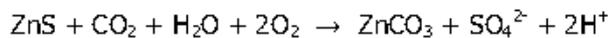
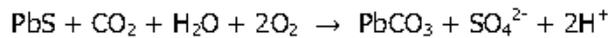


Los iones H^+ incrementan la acidez del medio. Los iones SO_4^{2-} y Fe^{3+} formados, actúan favoreciendo la oxidación de nuevos sulfuros y aumentando la acidez del medio (Lottermoser, 2007).



Estas reacciones explican los resultados principales de la oxidación de los sulfuros: la generación de un efluente ácido y el desarrollo de minerales de hierro, generalmente hidróxido férrico.

El CO₂ actúa en el proceso de oxidación produciendo la carbonatación del metal y suministrando iones sulfato, que catalizarán futuras reacciones de oxidación además de aumentar la acidez del medio.



7.2.2. Reacciones y productos de la hidratación.

En la zona mineralizada, las etapas finales del proceso de alteración supergénica conducen a un gran número de sulfatos con diferente grado de hidratación (Kohfahl et al., 2008; Lapakko, 2002), que aparecen como eflorescencias salinas y que pueden retener metales liberados durante el proceso de oxidación.

Como la hidratación genera un aumento de volumen, al pasar las fases anhidras a hidratadas, se crean tensiones internas suficientes para provocar fracturas en el material original, lo que favorece la desagregación física del mismo y otros procesos de alteración.

Pueden diferenciarse los siguientes grupos:

- Sulfatos de metal trivalente, como aluminio (alunógeno, Al₂(SO₄)₃·17H₂O) o hierro férrico (coquimbita, Fe₂(SO₄)₃·9H₂O).
- Sulfatos de la serie isomorfa de metal divalente, como cinc (bianchita, ZnSO₄·6H₂O); hierro ferroso (melanterita, FeSO₄·7H₂O) y magnesio (hexahidrita, MgSO₄·6H₂O).
- Sulfatos dobles hidratados de metal trivalente (Fe, Al) con metal divalente (Mg, Fe, Zn); con una relación molar metal trivalente/metal divalente de 4 en el grupo de la copiapita (FeFe₄(SO₄)₆·20H₂O) y de 2 en el de la halotrichita (FeAl₂(SO₄)₄·22H₂O), todos ellos con diferente grado de hidratación.

En estudios realizados en yacimientos de sulfuros del sureste de España (López y Arana, 1992) se proponen tres etapas de mineralogénesis para el proceso de alteración supergénica, teniendo lugar la formación de sulfatos hidratados en la segunda y tercera etapas (Figura 7.9).

Los sulfatos que aparecen en primer lugar son los de los elementos divalentes, debido a que su producto de solubilidad es más bajo (Garrido Medina, 2002).

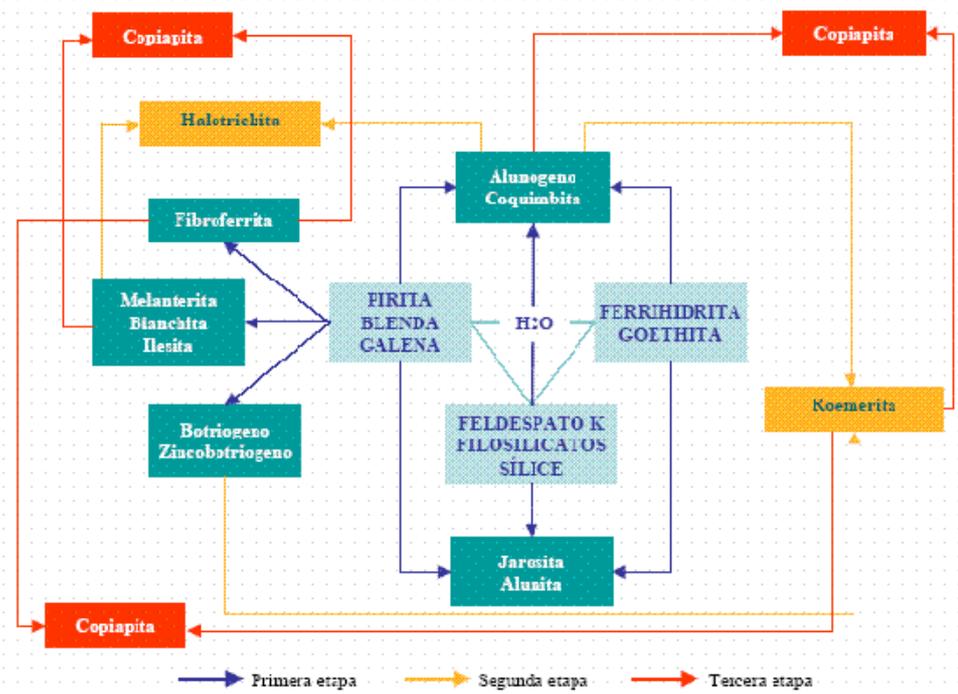
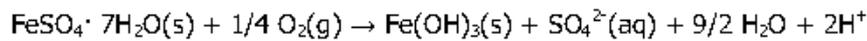
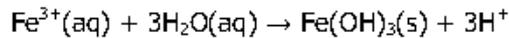
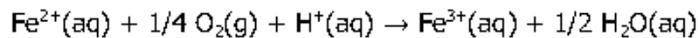
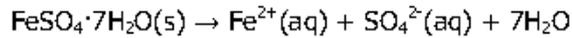


Figura 7.9. Esquema general de la formación de sulfatos en la alteración supergénica de yacimientos de sulfuros. Adaptado de López y Arana, 1992.

Estos sulfatos solubles contribuyen al aumento de acidez y a la liberación de elementos traza al medio cuando se produce su disolución e hidrólisis (Jambor et al., 2000). Los sulfatos de Fe²⁺ hidratados son nuevos precursores de la génesis de goethita que puede actuar como portador de elementos traza (Jönsson et al., 2006).



En zonas de clima árido, la acumulación de estos sulfatos puede explicar la mayor lentitud en la generación de drenajes ácidos de mina (Lapakko, 2002).

7.2.3. Reacciones y productos de la hidrólisis.

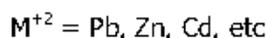
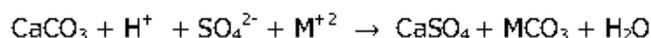
Sobre los minerales primarios (plagioclasas, piroxenos, anfíboles, etc.) presentes en las escombreras y balsas, puede tener lugar un proceso de hidrólisis (Montero et al., 2005).

Estas reacciones conducen a la acumulación de oxihidroxisulfatos, oxihidróxidos y óxidos de hierro, como jarositas o alunita a valores de pH inferiores a 3 (Swayze et al., 2000).

Los elementos traza pueden quedar retenidos en estas estructuras ya sea por procesos de adsorción o por su incorporación a la estructura mineral (Ferrier et al., 2008).

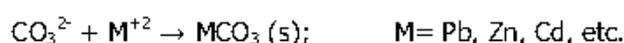
7.2.4. Reacciones y productos de la neutralización.

Las aguas ácidas que se generan en estas zonas mineras pueden reaccionar con los carbonatos formados en anteriores procesos, produciéndose una neutralización del pH, que supone un primer control en la atenuación de la contaminación por elementos traza (Dold et al., 2009) mediante procesos de precipitación, coprecipitación y adsorción.

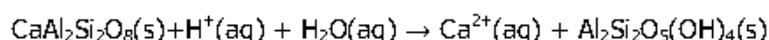


El agua de escorrentía, que proviene de materiales circundantes no mineralizados y carbonatados, presenta un alto contenido en iones bicarbonato, HCO_3^- . Cuando ésta reacciona con las aguas ácidas, se produce una neutralización de pH y coprecipitación de carbonatos básicos de hierro, que retienen cantidades variables de elementos traza.

Además, el metal soluble puede reaccionar con iones CO_3^{2-} , produciendo mayor cantidad del carbonato correspondiente que a su vez actuará como factor de neutralización de aguas ácidas:



La actuación de silicatos, tales como las plagioclasas o feldespatos, puede conducir también a la neutralización de las aguas ácidas (Schuwirth et al., 2007), siendo más acusados estos procesos al aumentar el contenido en estos minerales y cuanto menor es el tamaño de partícula de los mismos (Lapakko, 2002).



7.2.5. Reacciones y productos de adsorción/desorción y complejación.

Las reacciones de adsorción de los elementos traza sobre superficies sólidas suelen presentar un modelo típico de adsorción sobre el oxihidróxido de hierro (Sheoran y Sheoran, 2006). A pH alto ($\text{pH} > 6$), los metales son preferentemente adsorbidos por el óxido de hierro, pero a $\text{pH} < 3$, permanecen en disolución. Por ello, el proceso de adsorción de metales durante el transporte es importante y está regulado por el pH, produciéndose un aumento de pH a medida que se mezclan las aguas ácidas con las suspensiones carbonatadas,

viéndose favorecida la adsorción de los metales por los óxidos/hidróxidos de hierro.

Los filossilicatos pueden comportarse como adsorbentes con mecanismos similares a los comentados (Navarro Hervás, 2004).

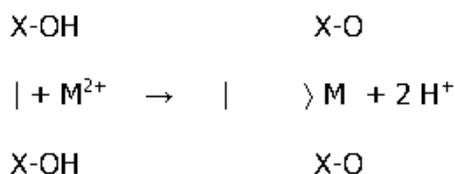
Dentro de los procesos de adsorción que tienen lugar en la etapa de sedimentación, desempeñan un papel importante los minerales de la arcilla, que actúan como posibles adsorbentes de:

- Elementos traza solubles en las aguas de lixiviación.
- Elementos traza liberados *in situ* por oxidación del sulfuro particulado.
- Elementos traza liberados en un proceso de desorción de los óxidos/hidróxidos de Fe y Mn particulados, provocado por una disminución de pH al contacto con aguas ácidas.

El mecanismo que regula estos procesos puede explicarse por complejación (Pérez-Sirvent et al., 1999), ya que las superficies de los óxidos e hidróxidos pueden adsorber metales formando complejos,



o quelatos



El pH desempeña un papel importante en estas reacciones. En zonas de rambla con $pH < 3$ y con medios ligeramente oxidantes, los metales sufren un proceso de desorción de los oxihidróxidos de hierro y manganeso, como se ha comentado anteriormente; en cambio, si el pH es ligeramente alcalino, el hierro y el manganeso pueden precipitar como carbonatos, que son menos adsorbentes que los correspondientes oxihidróxidos (Navarro Hervás, 2004).

7.2.6. Reacciones y productos del drenaje ácido de minas.

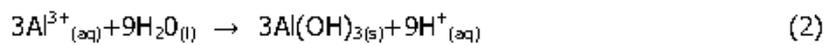
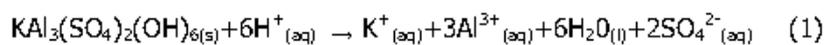
Existen gran cantidad de procesos geoquímicos y biogeoquímicos que afectan a las aguas de mina. Estos procesos, aunque no son exclusivos de zonas con actividad minera, directa o indirectamente influyen en la química de las aguas de drenaje ácido de minas.

- **Adsorción/Desorción:** Los procesos de adsorción en medios con actividad minera pueden ocurrir sobre partículas ricas en hierro y aluminio y sobre la fracción arcilla suspendida en las aguas, sobre precipitados, en puntos de percolación y sobre sedimentos arcillosos, en cauces o en charcos. Generalmente, los compuestos sólidos adsorben más aniones si el pH es bajo y más cationes si es neutro. Además, la adsorción depende de la presencia de ligandos complejantes y de la concentración del metal en el medio.

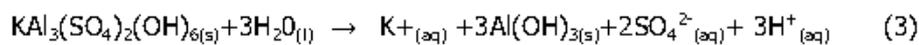
A valores de pH bajos, los elementos que con mayor facilidad son adsorbidos son el arsénico y el plomo, mientras que el cadmio y el níquel lo hacen a valores de pH neutro (Plumlee et al., 1999). Así, a medida que las aguas de drenaje ácido de minas se van neutralizando, van precipitando minerales secundarios y adsorbiendo metales. Este proceso es reversible, ya que los iones pueden volver a ser incorporados a la solución. De manera general, los metales, metaloides y los iones sulfato sufren procesos de desorción a pH cercanos a la neutralidad o alcalinos (Plumlee et al., 1999; Rose and Elliot, 2000).

- **Precipitación y disolución de minerales secundarios:** La precipitación de minerales secundarios y de sustancias amorfas o mal cristalizadas es un fenómeno común en zonas mineras afectadas por procesos de drenaje ácido. Estas sales pueden ser clasificadas en muy solubles, poco solubles e insolubles. De entre las sales solubles, las formadas con Fe^{2+} y Al^{3+} junto con los sulfatos de Fe^{2+} , Fe^{3+} y Mn^{2+} son las que más influyen en las variaciones de pH del agua, ya que en su formación se consumen/generan iones hidrógeno. Por otro lado, las

jarositas pueden clasificarse como fases poco solubles, muy influidas por el pH del agua (Smith et al., 2006). Su disolución se produce en dos pasos: la disolución de alunita ($\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$) y jarositas ($\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$) en principio consume iones hidrógeno (reacción 1), que puede ir seguido de una precipitación de gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), que aumenta la acidez (reacción 2). La reacción 3 engloba a las dos anteriores e ilustra cómo la disolución de jarositas y alunita aumenta la acidez, ya que se liberan protones al medio.



(Reacción 1+Reacción 2= Reacción 3)



La presencia de sulfatos es común en medios mineros donde ocurren procesos de drenaje ácido, sobre todo si las condiciones son oxidantes y hay concentraciones altas de cationes solubles, tales como calcio, magnesio, hierro y manganeso) (Buckby et al., 2003).

- **Coprecipitación:** este proceso se refiere la precipitación de elementos traza al mismo tiempo que está precipitando una sal mayoritaria. Cuando esto ocurre, el sólido precipitado se incorpora como impureza al cristal de la sal mayoritaria.
- **Acidez y condiciones redox del medio:** la solubilidad de los metales depende del pH del medio, así, bajos valores de pH, debidos a la oxidación de los sulfuros, incrementa la movilidad y biodisponibilidad de los elementos y la concentración de sólidos disueltos en el agua. Además del pH, en la movilidad de los elementos traza influye el potencial de oxido-reducción de la solución, de manera que aguas con

elevado contenido en oxígeno pueden cambiar el estado de oxidación del elemento y por tanto influir en su movilización.

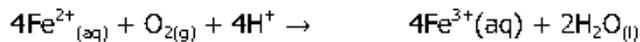
- **Elementos traza:** la oxidación de sulfuros puede provocar una liberación de elementos traza al medio, apareciendo éstos en diferentes formas en las aguas de drenaje. La mayoría de los elementos traza presentes en las aguas de drenaje ácido de minas aparecen como iones o formando sulfatos. En aguas con pH neutro o alcalino, la presencia de elevadas concentraciones de metales y/o metaloides se debe a la formación de oxianiones o complejos, así como la inexistencia de fenómenos de adsorción y coprecipitación con hidróxidos de hierro secundarios (Plumlee et al., 1999).

7.2.6.1. Sistemas.

Hierro.

Las elevadas concentraciones de hierro en aguas de mina son producto de la oxidación de la pirita y otros sulfuros ricos en hierro. El hierro puede aparecer en el agua como ión ferroso (Fe^{2+}) o ión férrico (Fe^{3+}) y puede estar combinado tanto con formas orgánicas como inorgánicas. Una vez que se produce la oxidación de sulfuros ricos en hierro, éste suele aparecer en la solución en forma ferrosa. El porcentaje de oxidación $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ depende del pH, del contenido en oxígeno disuelto y de la presencia de bacterias que favorezcan la oxidación del hierro: así, si el pH está entre 4-4,5 permanece como ión ferroso. La oxidación abiótica del Fe^{2+} a Fe^{3+} es en general lenta, aunque en presencia de bacterias oxidantes de hierro el proceso se acelera (Schrenk et al., 1998). Por otro lado, concentraciones elevadas de hierro férrico aparecen en aguas con pH ácido. Además, en este caso también influye el contenido en sulfatos. Si el pH está por debajo de 3, el ión ferroso se oxida a férrico que precipita como hidróxido, oxihidróxido y/o oxihidrosulfato. En aguas neutras con cantidades considerables de Fe^{2+} , la oxidación de Fe^{2+} a Fe^{3+} produce la precipitación de elevadas

cantidades de $\text{Fe}(\text{OH})_3$, de manera que la solución se acidifica por las reacciones de hidrólisis, que liberan al medio iones hidrógeno:



De acuerdo con el esquema de la Figura 7.10, la oxidación de la pirita, en función del pH del medio y el contenido en sulfatos, puede dar lugar a diferentes productos.

- Bajo condiciones de pH entre 1,5 y 3 y altas concentraciones de sulfato disuelto, está favorecida la precipitación de jarosita y otros sulfatos en función de los iones presentes en la disolución. Al aumentar el pH se ve favorecida la precipitación de goethita.
- A valores de pH por debajo de 2 y concentraciones medias de sulfatos (1000-3000 mg/l), se ve favorecida la formación de schwertmannita (Acero et al., 2006).
- Cuando la concentración de iones sulfato es menor y el pH está entre 3 y 4, se forman una serie de minerales con grado de cristalinidad muy bajo y de color amarillento, que reciben el nombre de MDM (mine drainage minerales). Al aumentar el pH se ve favorecida la precipitación de goethita.
- Si el pH alcanza valores superiores a 5 y la oxidación de Fe^{2+} se produce en condiciones abióticas, se forma ferrihidrita, que en presencia de iones sulfato se transformará en goethita (España et al., 2005).
- Cuando el pH es menor a 6 y la concentración de sulfatos es baja, en medio bicarbonatado, se forma goethita.

Otros minerales como la lepidocrocita ($\gamma\text{-FeOOH}$) son menos frecuentes que la goethita o el hematites, y su aparición se relaciona con alteraciones de las condiciones redox (Jönsson et al., 2006).

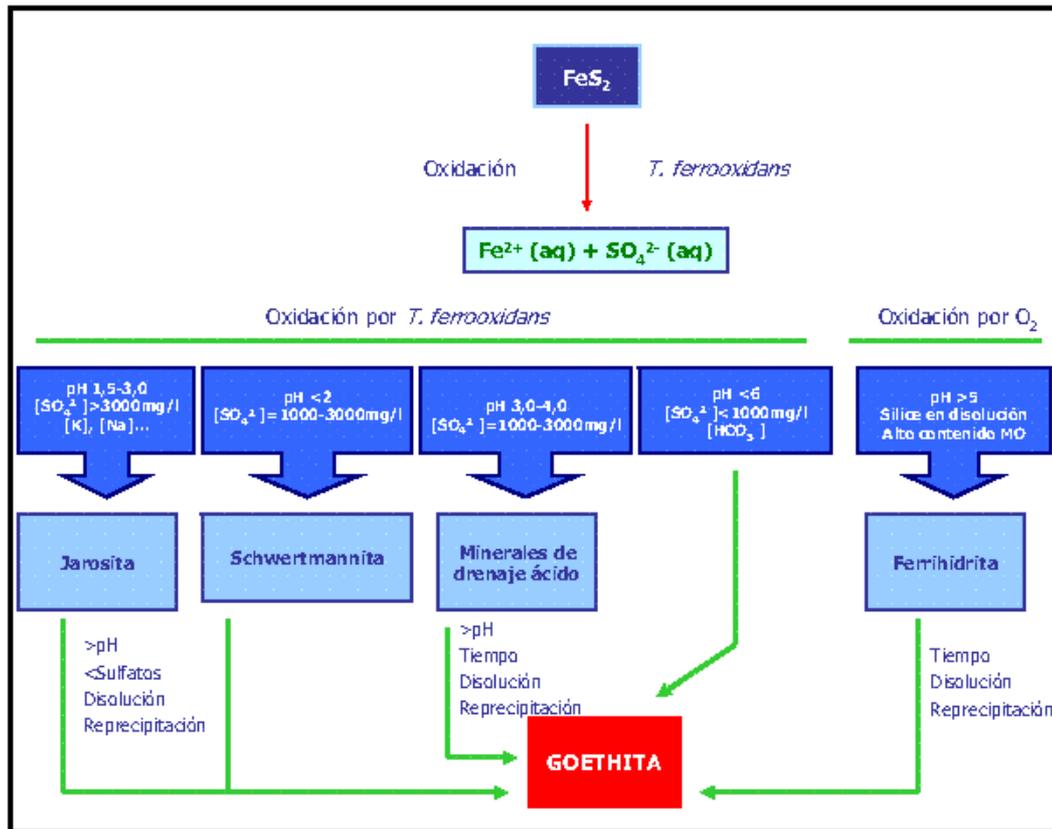


Figura 7.10. Modelo Biogeoquímico para la precipitación de algunos minerales procedentes de drenajes de minas ricas en sulfatos

La formación de minerales secundarios influye en el comportamiento de otros elementos: los minerales precipitados, al principio presentan tamaño de partícula fina y elevada área superficial, lo que favorece la adsorción de otros elementos. Además, pueden contener cantidades de otros elementos por procesos de coprecipitación y/o adsorción. Entre estos elementos, el arsénico es uno de los que más aparece asociado a estos precipitados (Kohfahl et al., 2008).

Aluminio.

La presencia de elevadas concentraciones de aluminio y silicio en aguas ácidas se debe a procesos de alteración de aluminosilicatos o por la disolución de minerales secundarios como la alunita ($KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$). El aluminio es un elemento insoluble si el pH está entre 5,7 y 6,2 y por debajo de este valor aumenta su solubilidad (Lottermoser, 2007).

El aluminio disuelto sólo presenta un estado de oxidación (Al^{3+}) y puede combinarse con iones orgánicos e inorgánicos (Nordstrom et al., 1999).

En cuanto a procesos de precipitación, el aluminio presenta un comportamiento similar al hierro, formando hidróxidos, oxihidróxidos y oxihidroxisulfatos, generalmente amorfos. Aún así, también puede formarse gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$).

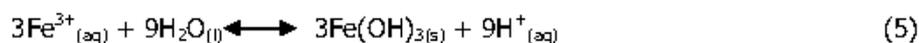
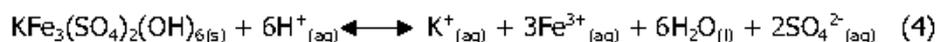
La cantidad de aluminio disuelto depende del pH, así valores cercanos a la neutralidad favorecen la precipitación de hidróxidos de aluminio así como la liberación de iones hidrógeno que aumentan la acidez:



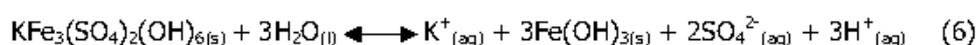
En algunas aguas de mina, la concentración disuelta de aluminio en el agua está limitada por la precipitación de sulfatos de aluminio. Las jarositas y la alunita pueden dar lugar a compuestos alunita-jarosita por procesos de evaporación de las aguas. De entre las jarositas, la que mayor prevalencia presenta es la de potasio, formada cuando existe potasio disuelto en el sistema.

Además de las jarositas potásicas también pueden aparecer natrojarositas o plumbojarositas según presente el sistema concentraciones disueltas de sodio o de plomo respectivamente (Lottermoser, 2007).

Las jarositas son a su vez fuente de acidez, sulfatos, hierro, aluminio y otros elementos traza.



Reacciones (4) + (5) = (6)



Arsénico.

El arsénico presente en las aguas de mina puede proceder de la oxidación de arsenopirita, oropimente, rejalgar, y de otros sulfuros en los que aparece como elemento traza, como la enargita y marcasita (Roddick-Lanzilotta et al., 2002).

El comportamiento del arsénico en el agua difiere del de otros metales, es móvil para un rango de pH amplio (desde extremadamente ácidos a alcalinos). El arsénico en el agua puede aparecer como As^{3+} en forma de arsenito (AsO_3^{3-}) y como As^{5+} en forma de arseniato (AsO_4^{3-}) siendo la forma As^{3+} más soluble, móvil y tóxica que el As^{5+} , estando favorecida la oxidación de uno a otro con el incremento de pH y salinidad así como por la presencia de ciertas bacterias y protozoos (Smedley y Kinniburgh, 2002).

El hierro también influye en el comportamiento del arsénico en las aguas, de manera que bajo condiciones oxidantes y pH menor de 3, precipitan hidróxidos férricos y el arsénico sufre un proceso de coprecipitación, siendo en este caso más adsorbido el As^{5+} (Roddick-Lanzilotta et al., 2002). El arsénico también puede precipitar formando parte de jarositas, schwertmannita y ferrihidrita (Fukushi et al., 2003; Courtin-Nomade et al., 2005).

La solubilidad del arsénico está también influida por (a) la adsorción en arcillas, (b) la formación de sulfoarseniatos amorfos de hierro y minerales de arsénico secundarios como la escorodita ($FeAsO_4 \cdot 2H_2O$), arsenolita (As_2O_3) o arseniatos de hierro-calcio como la farmacolita ($Ca(AsO_3OH) \cdot 2H_2O$) y (c) por la sustitución del arsénico por sulfatos en jarositas y yeso y por carbonatos en la calcita (Williams, 2001).

Aunque la precipitación de minerales secundarios de arsénico y su adsorción puede limitar la movilidad del arsénico, la movilización desde los minerales a las aguas se debe a varios procesos, (a) desorción a pH superiores a 8,5 y bajo condiciones oxidantes; (b) desorción y disolución del hidróxido férrico por cambios a condiciones reductoras; (c) disolución de minerales de arsénico (Salzsauler et al., 2005). Por el contrario, condiciones fuertemente reductoras no favorecen la movilidad de este elemento ya que aparece hierro y sulfuro de hidrógeno, produciéndose un fenómeno de coprecipitación de sulfuro de arsénico y de hierro.

Mercurio.

El mercurio presente en las aguas de mina procede de la alteración del cinabrio (HgS), metacinabrio (HgS), calomel (HgCl_2), mercurio ($\text{Hg}_{(l)}$), livingstonita (HgSb_4S_7) y mercurio nativo (Hg). El mercurio aparece en las aguas como mercurio elemental (Hg^0) o como iónico (Hg^+ y Hg^{2+}) pudiendo ser adsorbido por la materia orgánica, hidróxidos de hierro y minerales de la arcilla (Covelli et al., 2001).

Plomo.

El plomo puede formar parte de minerales como la galena (PbS), anglesita (PbSO_4) y cerusita (PbCO_3), pudiendo pasar al agua de mina por la alteración de la galena principalmente.

La oxidación de estos sulfuros libera al agua elevadas concentraciones de plomo que, en general, aparece disuelto como ión (Pb^{2+}) si los valores de pH están por debajo de 6, aunque también puede formar complejos con aniones orgánicos, cloruros, hidróxidos y compuestos poco solubles o insolubles, con sulfuros, sulfatos, fosfatos e hidroxicarbonatos (Lottermoser, 2007).

La movilidad del plomo depende de los procesos de adsorción por las arcillas, por el contenido en materia orgánica, la formación de óxidos secundarios de hierro y manganeso y la formación de minerales poco solubles como la anglesita (PbSO_4), cerusita (PbCO_3) y piromorfita ($\text{Pb}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{Cl}_2$).

Cadmio.

Los minerales de cadmio no se encuentran en cantidad suficiente como para llevar a cabo una actividad minera del elemento (Higueras y Oyarzun, 2002). Procede de la extracción de minerales, principalmente de cinc y en menor medida, de los minerales de plomo y cobre, donde se recupera como subproducto.

El cadmio presenta un único estado de oxidación (Cd^{2+}) y forma complejos con haluros, cianuros y especies derivadas del amonio, además de presentar afinidad por la materia orgánica.

La mayor movilidad de este elemento está influida por el pH, siendo la más elevada si el pH está entre 4,5 y 5,5.

Cinc.

Su presencia en el agua se debe principalmente a los procesos de alteración de esfalerita en zonas con actividad minera y la concentración en el agua está controlada por la adsorción con partículas de arcilla, con la materia orgánica o con los hidróxidos de hierro, aluminio y manganeso (Lottermoser, 2007).

La movilidad del cinc es elevada si las condiciones del medio son oxidantes y los valores de pH ácidos. Si el pH está por debajo de 7,5 aparece como Zn^{2+} , mientras que por encima de este valor forma complejos poco solubles con carbonatos y/o hidroxilos.

Si las condiciones son reductoras y el pH es ácido se favorece la formación de esfalerita.

Cobre.

Se encuentra formando parte de sulfuros como la calcopirita ($CuFeS_2$), sulfatos, carbonatos y otros compuestos e, incluso puede aparecer en ambientes reductores como cobre elemental.

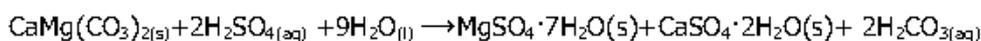
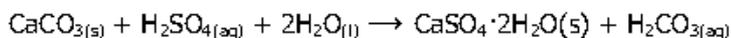
El cobre es un elemento móvil si las condiciones del medio son oxidantes y si el pH es inferior a 5. Los procesos que controlan su fijación en el suelo son la adsorción, especialmente sobre óxidos de hierro y manganeso, hidróxidos amorfos de hierro y aluminio y arcillas (Kabata- Pendias, 2001); oclusión, coprecipitación y la actividad microbiana (Navarro Hervás, 2004). Puede llegar a formar complejos muy estables con los grupos carboxilo presentes en la materia orgánica.

Sulfatos.

Los sulfuros pueden ser oxidados a azufre elemental o más comúnmente a sulfatos, que pueden precipitar formando minerales secundarios.

Las aguas de mina suelen presentar concentraciones elevadas de sulfatos, excediendo el contenido de hierro y otros elementos traza. Esta elevada concentración en el agua se debe a que, a excepción de la precipitación, no existen procesos naturales de eliminación de sulfatos del agua (Lottermoser, 2007).

Entre los sulfatos secundarios que se forman destaca el yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), la epsomita ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) y la jarosita ($\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$) siendo el yeso la sal más común en medios con drenaje ácido de mina. El calcio que forma parte de este yeso procede de la alteración ácida de los carbonatos y silicatos (calcita, dolomita y plagioclasas). Además, la formación de yeso puede deberse a procesos de neutralización de las aguas de mina.



Carbonatos.

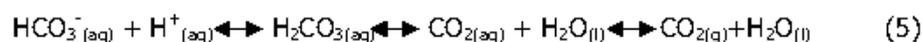
El sistema de carbonatos afecta en gran medida al potencial de neutralización del agua (Fukushi et al., 2003). Este sistema incluye una serie de reacciones en las que interviene el dióxido de carbono (CO_2), el bicarbonato (HCO_3^-) y el ácido carbónico (H_2CO_3). La presencia de ácido carbónico en el agua puede provenir de diversas fuentes, siendo las más importantes la alteración de rocas carbonatadas (reacción 1-3) y la incorporación de dióxido de carbono atmosférico (reacción 4), siendo más importante la alteración de rocas carbonatadas que la incorporación del CO_2 atmosférico.



La presencia de una y otra forma depende del pH del agua, de la concentración iónica y de la aparición de otros compuestos químicos en la solución (Lottermoser, 2007).

- El bicarbonato es la especie predominante si el pH está entre 6,3 y 10.
- El carbonato es la especie mayoritaria a pH superior a 10,3.
- El ácido carbónico es la especie que predomina si el pH es menor a 6,3.

La presencia de bicarbonato en el agua disminuye la acidez del medio ya que capta iones hidrógeno para formar ácido carbónico. Por tanto, la alcalinidad del agua puede medirse en función de la relación entre bicarbonato y ácido carbónico. La reacción entre el bicarbonato y los iones hidrógeno es fácilmente reversible, por lo que la disminución de la acidez no es permanente (reacción 5):



pH.

En las etapas iniciales de drenaje, los sulfuros se exponen al agua y al oxígeno, y la acidez generada queda neutralizada por minerales como la calcita, manteniendo el pH en valores cercanos a la neutralidad.

Si el proceso continúa hasta que la calcita desaparece, el pH desciende sustancialmente. Además de la calcita hay otros minerales que pueden tamponar los cambios de pH: siderita, silicatos, hidroxisulfatos de aluminio, hidróxidos de hierro/aluminio y ferrihidrita (Fukushi et al., 2003; Sherlock et al., 1995).

- Calcita: La calcita tiene capacidad tamponadora en valores cercanos a la neutralidad (6,5-7,5). Si aparece disuelta por el ácido o no aparece, es la siderita la que actúa como tampón, para valores de pH entre 5 y 6.
- Silicatos: la capacidad tamponadora de los silicatos se sitúa en valores de pH entre 5 y 6.

- Arcilla: las arcillas tamponan la solución cuando el pH está entre 3 y 4.
- Hidróxidos de hierro/aluminio: actúan a pH más bajo (3-5).



**8. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MINERALÓGICA
DE LOS MATERIALES ESTUDIADOS**

La caracterización de los sedimentos se ha realizado teniendo en cuenta la influencia de los focos de contaminación.

Así, se han establecido cinco categorías:

- Contaminación primaria
- Contaminación secundaria
- Contaminación terciaria
- Muestras con origen diferente
- Muestras control

8.1. Zona A (Lo Poyo).

8.1.1. Contaminación primaria.

Los puntos A4 y A5 son los que presentan la mayor influencia de los focos de contaminación, ya que son las más cercanas a la balsa de estériles de flotación de Lo Poyo, además de estar influidos por los aportes procedentes de los suelos rojos de la zona.

El punto A9, aunque no está situado sobre la balsa, recibe los aportes de ésta, así como los procedentes de las balsas de la Sierra Minera, a través de la Rambla del Beal.

No presentan carbonato cálcico ni materia orgánica, sus valores de pH son neutros o ligeramente básicos y tienen elevada conductividad eléctrica, en función de la influencia de la intrusión marina, puesto que se encuentran a escasos metros de la playa (Tabla 8.1).

Los elementos mayoritarios muestran que es elevado el contenido en sílice y óxidos de hierro y aluminio fundamentalmente, de acuerdo con la mineralogía de las muestras (Tabla 8.2), que se caracteriza por la ausencia de carbonatos y la presencia de sulfatos (yeso, jarosita, alunita y goldichita), así como de óxidos y oxihidróxidos de hierro (hematites, goethita y akaganeita) (Tabla 8.3).

Los resultados del análisis granulométrico están recogidos en la Tabla 8.4 y en ella se observa que las muestras presentan una textura que oscila entre franca y areno-franca.

Finalmente, la Tabla 8.5 muestra los valores de elementos traza totales de estas muestras. En general, presentan elevado contenido en todos los elementos estudiados, a excepción del mercurio. Los valores medios fueron de 20619 mg kg⁻¹ de cinc, 2880 mg kg⁻¹ de plomo, 45 mg kg⁻¹ de cadmio, 13% de hierro, 1117 mg kg⁻¹ de arsénico, 470 mg kg⁻¹ de cobre, 3434 mg kg⁻¹ de manganeso y 520 µg kg⁻¹ de mercurio.

Estas muestras presentan una composición química y mineralógica similar a las muestras de foco, a excepción de los valores de pH, que son más elevados que los que se han determinado en las balsas de Lo Poyo (Martínez-Sánchez et al., 2007).

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (1:5) (dS/m)	% CaCO ₃	% M.O
A4	8,0	7,9	191	11,7	<ld	<ld
A5	8,5	8,5	250	11,7	1,3	<ld
A9	7,2	6,9	305	2,6	<ld	<ld
MEDIA	7,9	7,8	249	8,7	0,6	-

Tabla 8.1. Características generales de las muestras

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
A4	2	3	12	35	0,1	8	1	4	0,4	0,4	15	13,8
A5	2	4	12	34	0,1	10	2	5	0,4	0,5	13	14,2
A9	0,2	2	12	34	0,1	7	1	4	0,5	0,3	22	12,1
MEDIA	1,4	3,0	12,0	34	0,1	8,3	1,3	4,3	0,4	0,4	16,7	13,4

Tabla 8.2. Contenido en elementos mayoritarios

	Filo10	Filo7	Fsp	Cuarzo	Yeso	Jar	Hem	Gt	Aka	Alu	Gol	Amorfo
A4	15	12	6	29	13	10	4				8	5
A5	9	5	3	30	15	12	4	5	7		8	3
A9	8	7	2	29	14	12	3	6	6	3	7	4
MEDIA	10,7	8,0	2,3	32,0	13,3	10,7	3,7	3,7	4,3	1,0	7,7	3,7

Tabla 8.3. Composición mineralógica

Filo: Filosilicatos; Jar: Jarosita; Hem: Hematites; Gt: Goethita; Aka: Akaganeita; Alu: Alunita; Gol: Goldichita; Fsp: Feldespatos

	Seco				Húmedo			
	Arcilla	Limo	Arena		Arcilla	Limo	Arena	
	<2 μ m	2-50 μ m	50-2000 μ m		<2 μ m	2-50 μ m	50-2000 μ m	
A4	6	35	59	Franca	0	25	75	Franco-arenosa
A5	3	24	73	Areno-franca	0	24	76	Areno-franca
A9	2	21	77	Areno-franca	3	43	55	Franco-arenosa
MEDIA	4	27	69	Franco-arenosa	1	31	68	Franco-arenosa

Tabla 8.4. Resultados del análisis granulométrico

	Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg μ g/kg
A4	24177	3405	24	103440	943	599	3240	1558
A5	30405	2317	64	105695	1627	645	3668	2
A9	7274	2919	48	195926	782	165	3395	<ld
MEDIA	20619	2880	45	135020	1117	470	3434	520

Tabla 8.5. Contenido de elementos traza

8.1.2. Contaminación secundaria.

Al igual que las muestras anteriores, los sedimentos que sufren una contaminación secundaria, presentan valores de pH básicos, tanto por el elevado contenido en carbonatos como por los procesos de alcalinización de los Xerosoles lúvicos y/o cálcicos de la zona (Tabla 8.6).

La composición mineralógica de estas muestras se caracteriza por la presencia de calcita, dolomita y sulfatos en los puntos A10 y A14, en este caso goldichita.

Los resultados del análisis granulométrico están recogidos en la Tabla 8.9, presentando estas muestras textura franco-arenosa, tanto en húmedo como en seco.

Finalmente, la Tabla 8.10 muestra los valores de elementos traza totales de estas muestras. En general, presentan menor contenido para todos los elementos determinados que las muestras A4, A5 y A9, a excepción del mercurio. Las muestras afectadas por contaminación secundaria presentan por un lado influencia de la balsa de estériles de Lo Poyo, y por otro, su contenido en

elementos traza se debe a los niveles de fondo de los suelos rojos (Luvisoles cálcicos y Xerosoles lúvicos).

Están sufriendo un proceso de atenuación natural, ya que los elementos traza han precipitado al reaccionar con los carbonatos procedentes de los suelos circundantes.

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (1:5) (dS/m)	% CaCO ₃	%M.O
A10	8,2	8,0	108	2,0	16,1	<ld
A12	8,1	7,7	189	1,8	15,3	1,6
A13	8,2	7,8	228	2,0	25,0	1,2
A14	8,2	8,1	108	1,7	16,1	<ld
MEDIA	8,2	7,9	158	1,9	18,1	0,7

Tabla 8.6. Características generales de las muestras

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
A10	0,5	3	8	35	0,2	1	1	18	0,4	0,3	12	17,6
A12	0,5	2	11	44	0,1	1	3	6	0,5	0,2	10	12,8
A13	0,4	2	13	42	0,2	1	2	7	0,5	0,2	10	14,2
A14	0,5	2	9	36	0,2	1	1	16	0,4	0,3	13	17,6
MEDIA	0,5	2,3	10,3	39,3	0,2	1,0	1,8	11,8	0,5	0,3	11,3	15,6

Tabla 8.7. Contenido en elementos mayoritarios

	Filo10	Filo7	Fsp	Cuarzo	Hem	Cal	Dol	Gol	Amorfo
A10	11	4	7	28	3	23	13	8	3
A12	18	3	6	44	6	18	5		1
A13	18	5	5	39	5	20	6		1
A14	9	6	8	27	3	24	12	8	3
MEDIA	14,0	4,5	6,5	34,5	4,3	21,3	9,0	4,0	14,0

Tabla 8.8 Composición mineralógica

Filo: Filosilicatos; Fsp: Feldespatos; Hem: Hematites; Cal: Calcita; Dol: Dolomita; Alu: Alunita; Gol: Goldichita

	Seco				Húmedo			
	Arcilla	Limo	Arena		Arcilla	Limo	Arena	
	<2µm	2-50µm	50-2000µm		<2µm	2-50µm	50-2000µm	
A10	3	21	77	Areno-franca	4	24	72	Franco-arenosa
A12	6	31	63	Franco-arenosa	3	46	51	Franco-limosa
A13	7	34	59	Franco-arenosa	1	15	85	Areno-franca
A14	3	20	76	Areno-franca	4	24	73	Franco-arenosa
MEDIA	5	27	69	Franco-arenosa	3	27	70	Franco-arenosa

Tabla 8.9. Resultados del análisis granulométrico

	Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
A10	9734	788	14	100665	384	287	2279	1423
A12	5456	2133	40	64990	1230	300	1990	799
A13	5234	2380	30	94340	1480	180	2039	1099
A14	9700	780	10	100665	385	288	2280	1420
MEDIA	7539	1522	28	90165	873	265	2147	1133

Tabla 8.10. Contenido de elementos traza

8.1.3. Contaminación terciaria.

Las muestras A1, A2, A3 y A6 son sedimentos de rambla (Fluvisoles) afectados por contaminación terciaria. Sus valores de pH son neutros o ligeramente alcalinos, todos presentan carbonatos en su composición y no muestran influencia marina (Tabla 8.11).

En la composición mineralógica de estas muestras se observa (Tabla 8.13) que ninguna de ellas tiene yeso, ni alunita, además de que el contenido en otros sulfatos es menor que en las muestras muy influidas por los focos de contaminación. Además, todas presentan calcita y dolomita en su composición, junto con filosilicatos.

Los resultados del análisis granulométrico están recogidos en la Tabla 8.14 y muestran como la textura en seco es franco-arenosa o areno-franca y franco-arenosa en húmedo, propia de sedimentos de rambla (Tabla 8.14).

Se encuentran situadas en zonas topográficamente más elevadas que la balsa de Lo Poyo, y por tanto fuera de su influencia, por lo que los elementos traza que presentan provienen de los focos de la Sierra Minera (Tabla 8.15).

Durante el transporte se han mezclado con materiales circundantes carbonatados, favoreciendo el proceso de atenuación natural, pero a su vez esta atenuación está limitada, ya que la rambla está actualmente canalizada.

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (1:5) (dS/m)	% CaCO ₃	% M.O
A1	7,6	7,4	127	1,5	12,6	<ld
A2	7,7	7,5	156	1,7	2,7	<ld
A3	7,8	7,7	105	1,2	4,3	1,3
A6	8,6	7,9	189	1,4	15,3	1,6
MEDIA	7,9	7,6	144	1,5	8,7	0,8

Tabla 8.11. Características generales de las muestras

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
A1	0,3	2	15	37	0,1	3	2	4	0,4	0,5	21	12,3
A2	0,6	2	14	36	0,1	3	2	4	0,4	0,4	21	14,1
A3	0,6	2	14	36	0,1	3	2	4	0,4	0,4	21	9,8
A6	0,4	2	13	42	0,2	1	2	7	0,5	0,2	10	12,8
MEDIA	0,5	2,0	14,0	37,8	0,1	2,5	2,0	4,8	0,4	0,4	18,3	12,3

Tabla 8.12. Contenido en elementos mayoritarios

	Filo14	Filo10	Filo7	Fsp	Cuarzo	Jar	Hem	Cal	Dol	Gt	Gol	Amorfo
A1	12	11	10	5	17	8	5	8		6	14	5
A2		13	10	6	20	8	6	14		7	9	7
A3		16	9	4	33	6	5	13	6	6		3
A6	18	3	6	44	6	18	5					1
MEDIA	8	11	9	15	19	10	5	9	2	5	6	4

Tabla 8.13 Composición mineralógica

Filo: Filosilicatos; Fsp: Feldespatos; Jar: Jarosita; Hem: Hematites; Cal: Calcita; Dol: Dolomita; Gt: Goethita; Gol: Goldichita

	Seco				Húmedo			
	Arcilla	Limo	Arena		Arcilla	Limo	Arena	
	<2µm	2-50µm	50-2000µm		<2µm	2-50µm	50-2000µm	
A1	6	28	67	Franco-arenosa	1	83	16	Limosa
A2	2	7	92	Arenosa	2	82	16	Limosa
A3	4	22	74	Areno-franca	1	18	80	Areno-franca
A6	6	30	64	Franco-arenosa	3	45	52	Franco-limosa
MEDIA	5	22	74	Areno-franca	2	57	41	Franco-arenosa

Tabla 8.14. Resultados del análisis granulométrico

	Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
A1	15438	3118	46	151394	1294	674	14940	245
A2	23430	3594	35	111111	1348	306	9662	<ld
A3	5599	2274	20	110516	678	350	2434	<ld
A6	5455	2130	42	64991	1235	299	1992	794
MEDIA	12481	2779	36	109503	1139	407	7257	260

Tabla 8.15. Contenido de elementos traza

8.1.4. Muestras con origen diferente.

Las muestras A8 y A15 han sido recogidas en la playa y están formadas por arenas extraídas del fondo marino y depositadas actualmente en la playa. Tienen influencia antigua de elementos traza, elevado contenido en carbonatos, principalmente aragonito, y una textura arenosa (Tablas 8.16 a 8.20).

Por otro lado, los puntos A7 y A11 se corresponden con los suelos rojos típicos de la zona, dedicados a la agricultura. Estos puntos, aunque están situados en las proximidades del área de inundación de la rambla y presentan niveles de elementos traza elevados, son muy similares a otros suelos rojos de la zona (Luvisoles cálcicos y Xerosoles lúvicos) que no están influidos ni por aportes procedentes de flujos laterales ni por materiales procedentes de los arrastres actuales de la zona minera y cuyo origen está por determinar (Martínez-Sánchez et al., 2007) (Tablas 8.16 y 8.20).

El análisis químico total de los puntos A7 y A11 muestra un elevado porcentaje de SiO₂ y Al₂O₃, dado que se trata de muestras con elevado contenido en filosilicatos, feldespatos y cuarzo. En los otros dos puntos de muestreo (A8 y A15), el contenido en calcio es alto, correspondiendo a suelos con alto contenido en aragonito y dolomita (Tabla 8.17).

Tanto las muestras de la playa como las correspondientes a suelos rojos presentan valores de pH básicos.

Mineralógicamente, los puntos A8 y A15 están compuestos por cuarzo, aragonito, dolomita y hematites y los sedimentos A7 y A11 por feldespatos, calcita, dolomita y óxidos de hierro (Tabla 8.18).

El contenido en elementos traza es bajo en las arenas de playa, sin embargo, en los puntos A7 y A11, al igual que sucede con todas las muestras que se encuentran en zonas de suelos rojos o en su área de influencia, el contenido en elementos traza es elevado. Es importante remarcar que la concentración de mercurio, aunque en niveles escasos, se encuentra en mayor nivel en los suelos rojos o en su área de influencia.

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (1:5) (dS/m)	% CaCO ₃	%M.O
A7	8,6	8,0	228	0,9	25,0	1,7
A8	9,1	9,0	170	0,9	62,7	1,5
A11	8,3	7,5	169	5,3	3,1	1,0
A15	8,7	8,2	170	6,2	68,5	1,5
MEDIA	8,7	8,2	184	3,3	39,8	1,4

Tabla 8.16. Características generales de las muestras

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
A7	0,4	2	13	42	0,2	1	2	7	0,5	0,2	10	14,2
A8	0,3	1	1	28	0,03	1	0,2	42	0,1	0,1	1	34,4
A11	0,3	2	15	52	0,3	1	3	2	0,6	0,3	13	8,9
A15	0,3	1	1	20	0,02	1	0,2	40	0,1	0,1	1	35,1
MEDIA	0,3	1,5	7,5	35,5	0,1	1,0	1,4	22,8	0,3	0,2	6,3	23,2

Tabla 8.17. Contenido en elementos mayoritarios

	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Hem	Cal	Dol	Ara	Amorfo
A7	19	5	5	39	5	20	6		1
A8				29	2		4	64	1
A11	19	5	15	49	4	4			3
A15				22	2		3	62	1
MEDIA	9,3	2,5	5,0	34,8	3,3	6,0	3,3	31,5	1,5

Tabla 8.18. Composición mineralógica

Filo: Filosilicatos; Fsp: Feldespatos; Hem: Hematites; Cal: Calcita; Dol: Dolomita; Ara: Aragonito

	Seco				Húmedo			
	Arcilla	Limo	Arena		Arcilla	Limo	Arena	
	<2µm	2-50µm	50-2000µm		<2µm	2-50µm	50-2000µm	
A7	7	35	58	Franco-arenosa	1	19	80	Areno-franca
A8	0	0	100	Arenosa	0	0	100	Arenosa
A11	1	7	93	Arenosa	1	5	94	Arenosa
A15	0	0	100	Arenosa	0	0	100	Arenosa
MEDIA	2	11	88	Arenosa	1	6	94	Arenosa

Tabla 8.19. Resultados del análisis granulométrico

	Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
A7	2234	2383	31	94340	488	188	2036	1089
A8	516	25	2	2698	67	27	397	<ld
A11	3749	4620	108	140581	449	127	2952	179
A15	500	20	2	2698	67	27	397	<ld
MEDIA	1594	1557	37	48659	194	60	1249	60

Tabla 8.20. Contenido de elementos traza

8.1.5. Punto de muestreo control.

La muestra tomada como control en la zona presenta valores de pH básicos, contenido en carbonato cálcico elevado (45%) y un porcentaje de materia orgánica del 2,2% (Tabla 8.21).

En su composición mineralógica se han cuantificado calcita y dolomita, junto con filosilicatos, cuarzo y feldespatos, además de presentar hematites (Tabla 8.23).

La textura, tanto en húmedo como en seco, es similar a la del resto de muestras de esta zona, areno-franca, y el contenido en elementos traza se debe a niveles geogénicos (Martínez-Sánchez et al., 2007), no presentando influencia de las balsas de flotación de estériles, ni de la Sierra Minera ni de la balsa de Lo Poyo.

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (1:5) (dS/m)	% CaCO ₃	%M.O
SCA	8,7	8,2	160	0,3	45	2,2

Tabla 8.21. Características generales de la muestra control

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
SCA	0,5	3	6	37	0,2	1	1	20	0,4	0,3	10	17,6

Tabla 8.22. Contenido en elementos mayoritarios en lamuestra control

	Filo14	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Hem	Cal	Dol	Amorfo
SCA	1	10	4	7	36	3	23	13	3

Tabla 8.23. Composición mineralógica de la muestra control

Filo: Filosilicatos; Hem: Hematites; Filo: Filosilicatos; Fsp: Feldespatos; Cal: Calcita; Dol: Dolomita

	Seco				Húmedo			
	Arcilla	Limo	Arena		Arcilla	Limo	Arena	
	<2µm	2-50µm	50-2000µm		<2µm	2-50µm	50-2000µm	
SCA	5	18	77	Areno-franca	6	19	75	Areno-franca

Tabla 8.24. Resultados del análisis granulométrico de la muestra control

	Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
SCA	40	14	0,3	651	6	12	350	0,2

Tabla 8.25. Contenido de elementos traza en la muestra control

8.1.6. Análisis estadístico.

Se ha realizado un estudio de las correlaciones y un análisis de componentes principales.

La Tabla 8.26 recoge los resultados del análisis de correlaciones entre los elementos traza, las características analíticas generales y la textura de las

muestras de la zona de Lo Poyo. En ella se observa la correlación negativa existente entre cinc, plomo, cadmio, hierro, arsénico y cobre y el contenido en carbonato cálcico, esto es, la presencia de carbonato cálcico en el sedimento se corresponde con suelos en los que el contenido total de estos elementos es menor. Además, el arsénico, el cobre y el manganeso están positivamente correlacionados con la fracción limo, ya que el transporte de estos elementos va ligado a esta fracción.

Por otro lado, el cinc está positivamente correlacionado con la conductividad eléctrica, y por ello, a las sales solubles, principalmente en forma de cloruros o sulfatos. El pH también es un factor relevante en el contenido de elementos traza en esta zona, ya que los sedimentos con valores más elevados de pH se corresponden con menores contenidos de plomo, hierro y manganeso. Los valores más elevados de pH se dan en suelos que han sufrido un proceso de alcalinización, y que a pesar de que presentan elementos traza, la concentración es menor que en suelos que presentan influencia minera.

Finalmente, entre los distintos elementos también existen correlaciones: así, el cinc aparece positivamente correlacionado con el arsénico, el cobre y el manganeso, el plomo lo hace con el cadmio, arsénico, hierro y manganeso y el hierro con el manganeso. Además, el arsénico presenta correlación positiva con el cobre y el manganeso y éstos dos a su vez también están correlacionados.

La Tabla 8.27 muestra los resultados del análisis de correlaciones entre los elementos traza y la mineralogía de los sedimentos. Destaca la elevada correlación entre cinc, plomo, hierro, cobre y manganeso y los filosilicatos a 7Å (caolinita), mineral abundante en los suelos rojos de la zona.

Por otro lado, y corroborando los resultados obtenidos en la Tabla 8.26, tanto el plomo como el cadmio y el arsénico están negativamente correlacionados con la dolomita, por lo que la presencia de este mineral en la muestra se corresponde con menor concentración de estos elementos.

En el caso concreto del cinc, éste aparece positivamente correlacionado con los sulfatos (yeso, goldichita y jarositas). Además, y positivamente correlacionados con las jarositas están el hierro, el arsénico, el cobre y el manganeso. Estos elementos, a excepción del arsénico también están positivamente correlacionados con la goldichita.

El contenido total en hierro aparece además correlacionado con los óxidos de hierro y con los amorfos.

Finalmente, el mercurio, a pesar de que su concentración no es elevada en la zona, está negativamente correlacionado con los oxihidróxidos de hierro, particularmente con la goethita.

En la Tabla 8.28 se muestra la matriz de correlaciones de Pearson entre los elementos traza y los componentes mayoritarios. En ella se observa como el plomo, el cadmio, el hierro, el arsénico, el cobre y el manganeso están positivamente correlacionados con los óxidos de aluminio, que aparecen en los suelos rojos de la zona. Además, el cinc, el hierro, el arsénico y el cobre lo hacen con el SO_3 , lo que corrobora su relación con los sulfatos.

Además, a excepción del manganeso y el mercurio, todos los elementos traza están negativamente correlacionados con el CaO, coincidiendo con un menor contenido en estos elementos si la muestra presenta carbonato cálcico en su composición.

	pH _{H2O}	pHKCl	Eh	CE	CaCO ₃	MO	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Hg	Arcilla	Limo
pHKCl	0,88*															
Eh	-0,09	-0,18														
CE	-0,02	0,13	0,00													
CaCO ₃	0,71*	0,63*	-0,13	-0,25												
MO	0,67*	0,39	-0,13	-0,48	0,64*											
Zn	-0,38	-0,08	0,10	0,64*	-0,61*	-0,82*										
Pb	-0,60*	-0,68*	0,26	0,27	-0,79*	-0,53**	0,45									
Cd	-0,29	-0,47	0,35	0,29	-0,62*	-0,33	0,26	0,81*								
Fe	-0,83*	-0,77*	0,24	0,12	-0,84*	-0,72*	0,42	0,77*	0,63*							
As	-0,44	-0,35	0,33	0,26	-0,63*	-0,49	0,65*	0,60*	0,49	0,47						
Cu	-0,43	-0,17	-0,06	0,49	-0,65*	-0,69*	0,82*	0,47	0,28	0,49	0,69*					
Mn	-0,60*	-0,48	-0,18	-0,04	-0,43	-0,64*	0,53**	0,52**	0,29	0,54**	0,51**	0,62*				
Hg	0,02	0,03	-0,16	0,07	-0,21	-0,05	0,09	0,00	-0,14	0,09	0,05	0,23	-0,16			
Arcilla	-0,09	-0,18	-0,21	-0,53**	-0,04	0,26	-0,27	-0,32	-0,24	-0,08	-0,24	-0,29	-0,15	0,17		
Limo	-0,64*	-0,56**	-0,05	-0,20	-0,49	-0,51*	0,48	0,44	0,17	0,46	0,61*	0,53**	0,84*	-0,06	0,19	
Arena	0,63	0,56**	0,07	0,24	0,49	0,48	-0,45	-0,41	-0,15	-0,44	-0,58**	-0,50**	-0,82*	0,05	-0,25	-1,00*

Tabla 8.26. Matriz de correlación de Pearson entre el contenido total de elementos traza, características analíticas generales y granulometría de los sedimentos.

(**) p<0,05; (*) p<0,01

	Filo14	Filo10	Filo7	Fsp	Cuarzo	Yeso	Jaros	Hema	Calci	Dol	Ara	Goet	Akag	Alun	Goldi	Amor
Filo10	-0,05															
Filo7	0,34	0,40														
Fsp	0,01	0,61*	0,14													
Cuar	-0,53**	0,19	-0,64*	0,15												
Yeso	-0,13	-0,13	0,33	-0,38	-0,16											
Jaros	0,25	-0,08	0,68*	-0,35	-0,58**	0,78*										
Hema	-0,09	-0,70*	-0,61*	-0,55	0,32	-0,24	-0,29									
Calci	-0,07	0,45	-0,05	0,44	-0,09	-0,59**	-0,55**	-0,45								
Dol	-0,22	-0,02	-0,34	0,21	0,03	-0,48	-0,64*	-0,15	0,80*							
Ara	-0,11	-0,78*	-0,63*	-0,55**	0,30	-0,18	-0,28	0,99*	-0,47	-0,09						
Goet	0,37	-0,06	0,58**	-0,22	-0,68*	0,34	0,82*	-0,22	-0,29	-0,49	-0,25					
Akag	-0,11	-0,23	0,05	-0,33	-0,15	0,83*	0,67*	-0,19	-0,47	-0,38	-0,14	0,48				
Alun	-0,07	-0,18	0,12	-0,23	-0,17	0,57**	0,49	-0,15	-0,32	-0,26	-0,10	0,38	0,62*			
Goldi	0,55**	-0,16	0,63*	-0,06	-0,87*	0,39	0,65*	-0,35	-0,15	-0,25	-0,32	0,54**	0,30	0,17		
Amor	0,35	0,01	0,78*	0,16	-0,79*	0,26	0,68*	-0,41	-0,14	-0,33	-0,39	0,71*	0,16	0,19	0,76*	
Zn	0,16	0,05	0,62*	-0,12	-0,56**	0,60*	0,75*	-0,35	-0,30	-0,46	-0,36	0,52**	0,44	-0,05	0,75*	0,65*
Pb	0,17	0,65*	0,66*	0,42	-0,10	0,29	0,49	-0,51	-0,24	-0,68*	-0,57**	0,42	0,15	0,17	0,28	0,47
Cd	0,10	0,51**	0,21	0,56**	0,18	0,25	0,26	-0,41	-0,28	-0,58**	-0,44	0,23	0,34	0,15	0,10	0,19
Fe	0,27	0,40	0,67*	0,28	-0,45	0,42	0,62*	-0,64*	-0,14	-0,42	-0,63*	0,57**	0,41	0,52**	0,56**	0,54*
As	0,27	0,38	0,49	-0,03	-0,33	0,40	0,62*	-0,41	-0,15	-0,55**	-0,50**	0,57**	0,40	0,03	0,49	0,41
Cu	0,48	0,26	0,66*	-0,08	-0,51**	0,44	0,64*	-0,44	-0,17	-0,38	-0,47	0,45	0,27	-0,15	0,71*	0,44
Mn	0,81*	0,11	0,64*	0,09	-0,74*	0,01	0,53**	-0,26	-0,11	-0,47	-0,31	0,67*	0,02	0,00	0,75*	0,73*
Hg	-0,15	0,40	0,15	0,21	0,01	-0,06	-0,30	-0,35	0,48	0,40	-0,34	-0,55**	-0,34	-0,23	0,12	-0,21

Tabla 8.27. Matriz de correlación de Pearson entre el contenido total de elementos traza y la composición mineralógica de los sedimentos.
(**) p<0,05; (*) p<0,01

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
MgO	0,73*											
Al ₂ O ₃	0,16	0,32										
SiO ₂	-0,04	0,30	0,79*									
P ₂ O ₅	-0,18	0,27	0,43	0,79*								
SO ₃	0,78*	0,60*	0,28	-0,12	-0,34							
K ₂ O	0,01	0,19	0,79*	0,86*	0,46	-0,04						
CaO	-0,27	-0,46	-0,97*	-0,80*	-0,42	-0,38	-0,77*					
TiO ₂	0,01	0,39	0,84*	0,95*	0,73*	0,07	0,78*	-0,88*				
MnO	0,54**	0,66*	0,61*	0,26	0,03	0,64*	0,30	-0,64*	0,32			
Fe ₂ O ₃	0,12	0,32	0,77*	0,40	0,10	0,44	0,38	-0,78*	0,54**	0,79*		
1000°C	-0,17	-0,48	-0,94*	-0,86*	-0,54**	-0,26	-0,77*	0,97*	-0,92*	-0,61*	-0,77*	
Zn	0,78*	0,63*	0,40	0,01	-0,22	0,77*	0,14	-0,45	0,10	0,78*	0,50**	-0,32
Pb	0,20	0,17	0,87*	0,65*	0,28	0,37	0,70*	-0,84*	0,68*	0,51**	0,66*	-0,75*
Cd	0,10	0,21	0,68*	0,68*	0,43	0,27	0,75*	-0,65*	0,67*	0,35	0,37	-0,62*
Fe	0,07	0,23	0,78*	0,48	0,24	0,65*	0,42	-0,77*	0,64*	0,60*	0,83*	-0,73*
As	0,46	0,40	0,66*	0,32	-0,15	0,56**	0,57**	-0,68*	0,39	0,61*	0,55**	-0,56**
Cu	0,66*	0,55**	0,56**	0,18	-0,15	0,63*	0,31	-0,57**	0,23	0,80*	0,54**	-0,48
Mn	0,00	0,05	0,53**	0,15	-0,13	0,22	0,30	-0,44	0,15	0,67*	0,65*	-0,36
Hg	0,20	0,20	0,14	0,29	0,39	-0,14	0,01	-0,18	0,29	-0,10	-0,09	-0,19

Tabla 8.28. Matriz de correlación de Pearson entre el contenido total de elementos traza y los elementos mayoritarios.
(**) p<0,05; (*) p<0,01

La Tabla 8.29 recoge los resultados del análisis de componentes principales realizado a las variables comentadas en la zona de Lo Poyo.

El primer factor incluye en su parte negativa el pH y en la positiva los óxidos de hierro y manganeso, los filosilicatos a 14Å y 7Å, la jarosita, la goldichita, la goethita y los amorfos. Además incluye el cinc, el hierro, el cobre y el manganeso.

El segundo factor engloba en su parte negativa el porcentaje en carbonato cálcico, el aragonito y el CaO y en la parte positiva los óxidos de aluminio, la sílice, los filosilicatos a 10Å, el cuarzo, los feldespatos y el hematites. Además incluye el plomo, el cadmio, el arsénico y el mercurio en la parte positiva.

Finalmente, el tercer factor incluye la conductividad eléctrica, el Na₂O, el MgO, el SO₃, el yeso y la alunita en la parte positiva, representando la parte soluble, mientras que en la parte negativa se agrupan los carbonatos (calcita y dolomita).

En la Figura 8.1 se han representado gráficamente las puntuaciones de cada muestra. La representación del F1 y el F2 muestra que en el segundo cuadrante se agrupan los puntos situados sobre suelos rojos o influidos por éstos. Entre ellos hay puntos clasificados como "de origen diferente" (A11 y A7) y otros afectados por contaminación secundaria, en los que además de la influencia de los suelos rojos de la zona, están recibiendo aportes de la balsa de Lo Poyo (A12, A13, A14, A10).

Por otro lado, en el primer y cuarto cuadrantes están las muestras afectadas por contaminación terciaria (A1, A2, A3) que reciben aportes de la Sierra Minera y de los suelos circundantes a través de la Rambla de Ponce.

Finalmente, los puntos A8 y A15, cuyo origen es muy distinto al resto, aparecen en el tercer cuadrante, caracterizados por elevado porcentaje en aragonito, elevado pH y concentración baja de elementos traza.

La representación gráfica del F1 y el F3 (Figura 8.1) muestra como en el primer y segundo cuadrantes aparecen las muestras afectadas por contaminación primaria, que presentan plomo, cadmio y arsénico en su composición, así como elevada concentración de sulfatos (alunita y yeso) y los valores más elevados de conductividad eléctrica.

Por otro lado, puntos de muestreo afectados por contaminación terciaria (A1, A2 y A3) se agrupan en el cuarto cuadrante, ya que a pesar de que

presentan elementos traza, en su composición mineralógica se ha cuantificado calcita y dolomita. El resto de muestras, tanto las afectadas por contaminación secundaria como los suelos rojos, se agrupan en el tercer cuadrante, mostrando un comportamiento similar para estos dos factores.

Finalmente, la representación del F2 y F3 agrupa a las muestras afectadas por contaminación primaria en el primer cuadrante (elevada concentración de plomo, cadmio, arsénico y mercurio junto con presencia de sulfatos).

Los puntos A8 y A15 se sitúan en el tercer cuadrante (elevado porcentaje de carbonatos, principalmente aragonito y escasa concentración de elementos traza).

	F1	F2	F3
pH H ₂ O	-0,780	-0,278	-0,135
pH KCl	-0,557	-0,501	0,019
Eh	-0,194	0,098	0,711
CE	-0,160	0,148	0,347
CaCO ₃	-0,546	-0,682	-0,393
MO	-0,762	0,014	-0,496
Na ₂ O	0,120	0,018	0,733
MgO	0,134	0,318	0,558
Al ₂ O ₃	0,512	0,814	0,146
SiO ₂	-0,058	0,954	-0,100
P ₂ O ₅	-0,245	0,771	-0,209
SO ₃	0,405	-0,078	0,893
K ₂ O	0,142	0,854	-0,012
CaO	-0,468	-0,824	-0,272
TiO ₂	0,112	0,955	0,121
MnO	0,780	0,236	0,318
Fe ₂ O ₃	0,828	0,400	0,141
Filo 14	0,652	-0,072	-0,304
Filo 10	0,032	0,954	-0,059
Filo 7	0,802	0,326	0,159
Feldspatos	0,002	0,767	-0,219
Cuarzo	-0,652	0,692	0,024
Yeso	0,199	-0,078	0,947
Jarosita	0,705	-0,088	0,676
Hematites	0,299	0,697	-0,101
Calcita	-0,175	0,439	-0,571
Dolomita	-0,428	0,006	-0,482
Aragonito	-0,354	-0,824	-0,135
Goethita	0,817	-0,069	0,224
Akaganeita	0,139	-0,089	0,839
Alunita	0,188	-0,076	0,406
Goldichita	0,820	-0,107	0,211
Amorfo	0,850	0,033	0,126
Zn	0,601	0,064	0,585
Pb	0,496	0,663	0,277
Cd	0,159	0,671	0,334
Fe	0,638	0,486	0,309
As	0,432	0,443	0,393
Cu	0,647	0,206	0,386
Mn	0,909	0,089	-0,134
Hg	-0,167	0,345	-0,054
Varianza (%)	43	19	11

Tabla 8.29. Factores obtenidos tras el análisis de componentes principales entre composición química, composición mineralógica, características analíticas generales y concentración de elementos traza

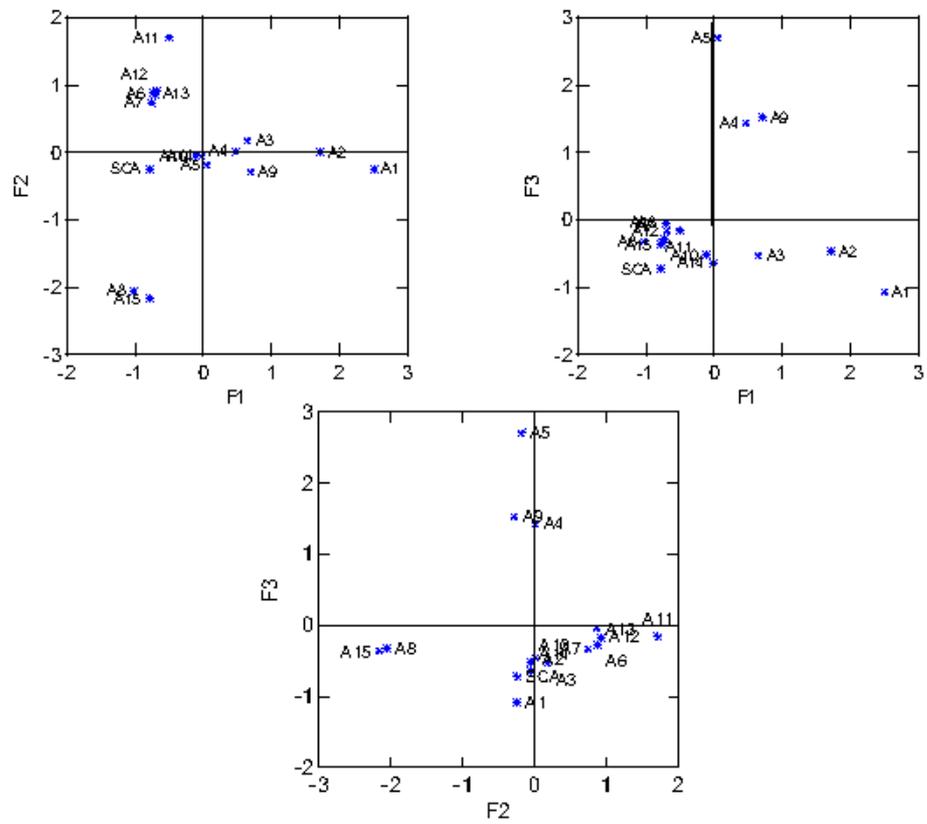


Figura 8.1. Representación gráfica de los factores obtenidos

8.1.7. Modelo conceptual de dispersión hídrica de la contaminación.

En esta zona podemos decir que existe un flujo de elementos traza, que provienen tanto de las balsas de estériles de flotación de la Sierra Minera como de la balsa situada en Lo Poyo. Además existe un flujo de carbonatos, tanto en forma soluble como particulada, que proviene de los relieves circundantes a la Sierra Minera y el Campo de Cartagena, y que favorece los procesos de atenuación natural de la contaminación.

Por otro lado, los suelos rojos sobre los que está situada la balsa de Lo Poyo, y aquellos que la circundan, aportan hematites, amorfos, filosilicatos y feldespatos, junto a unos contenidos en elementos traza elevados, característicos de estos suelos. Por último, existe un flujo derivado de la cercanía a la costa, de cloruros y sodio.

Estos flujos en la zona A vienen recogidos en la Figura 8.2. En ella se observa como a través de las Ramblas de Ponce y del Beal llegan aportes de carbonatos y elementos traza, tanto solubles como particulados procedentes de la Sierra Minera y los suelos circundantes.

Los puntos A1, A2, A3 y A6 son sedimentos típicos de rambla, con granulometría fina, abundantes filosilicatos y presencia de carbonatos, que facilita la precipitación de los elementos traza, estando estos sedimentos afectados por contaminación terciaria.

Las muestras A10, A12, A13 y A14, que en principio corresponden a contaminación terciaria, reciben un mayor aporte de elementos traza solubles desde la balsa de Lo Poyo, por lo que pasan a representar una contaminación secundaria. Además, en estas muestras es evidente la influencia marina.

Las muestras A4 y A5, localizadas en la zona superficial de alteración supergénica de la fuente contaminante, resultan del aporte de partículas correspondientes a minerales de la arcilla procedentes de los suelos rojos y a minerales de la alteración supergénica de la balsa de estériles sobre la que se sitúan. Sus características son similares a los focos de la Sierra Minera, a excepción de que los procesos de hidrólisis alcalina en las arcillas, saturadas en sodio por la influencia marina, provocan que el pH de estas muestras sea neutro

o ligeramente alcalino. Además de existir escorrentía hacia la zona oeste, con situación topográfica deprimida y habitualmente encharcada (A10, A12, A13 y A14) se da también un flujo de elementos traza a la playa (A8), principalmente arsénico.

Hacia el noroeste, la muestra A9 se encuentra en el abanico aluvial de la Rambla del Beal y también en una situación topográfica deprimida, por lo que recibe no solamente los elementos traza procedentes de la Sierra Minera a través de la Rambla del Beal (contaminación terciaria), sino que recibe un flujo importante desde la balsa próxima, que hace que los contenidos en elementos traza sean elevados.

Finalmente, los puntos A7 y A11, que se corresponden con suelos rojos, aunque están situados en las proximidades del área de inundación de las ramblas y presentan concentraciones de elementos traza elevadas, no están influidos ni por aportes procedentes de flujos laterales ni por materiales de los arrastres actuales mineros y cuyo origen está por determinar.

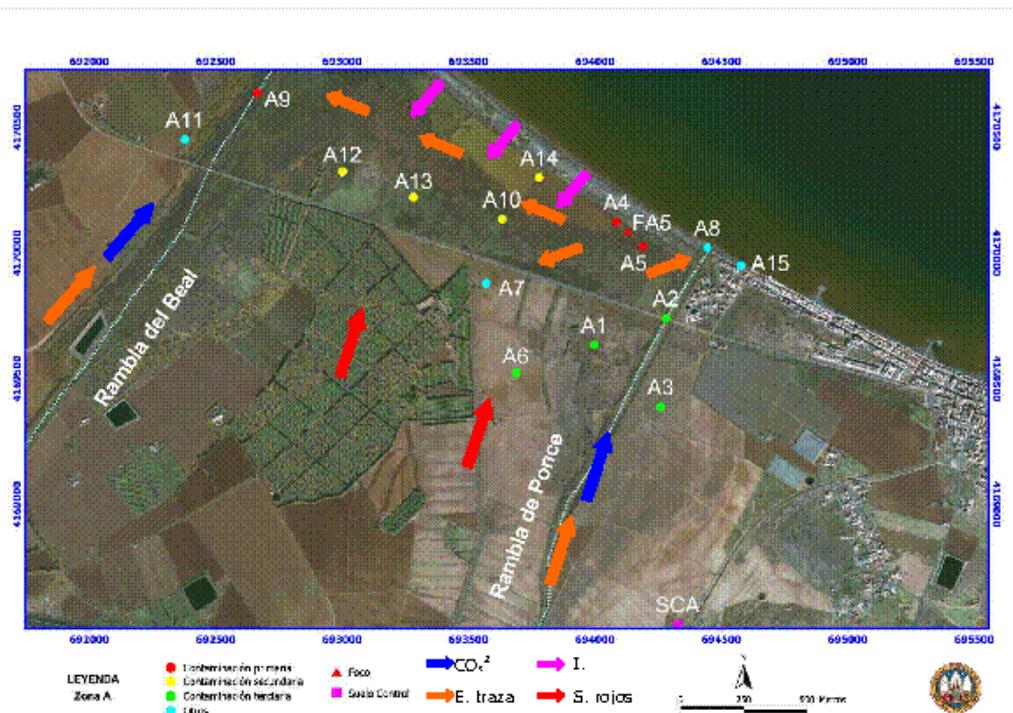


Figura 8.2. Cuadro resumen de los flujos en la zona de Lo Poyo

8.2. Zona B (Llano del Beal).

8.2.1. Contaminación primaria.

Las muestras B1, B7, B8, B11 y B12 son muestras muy influidas por las balsas de estériles de flotación de la Sierra Minera, y que sufren contaminación primaria. Todas presentan valores de pH ácidos, similares a los presentes en las balsas, sobre todo los sedimentos B7 y B8.

No presentan carbonato cálcico, ya que, debido a su cercanía a los focos, no se han mezclado con materiales circundantes, ricos en carbonatos. Además el contenido en materia orgánica es nulo, debido a la ausencia de vegetación (Tabla 8.30).

Entre los elementos mayoritarios, determinados por fluorescencia atómica de Rayos X, destacan los elevados porcentajes de óxidos de hierro y aluminio, junto con sílice y SO_3 , directamente relacionado con los sulfatos presentes en la muestra (Tabla 8.31).

La composición mineralógica se caracteriza por la ausencia de carbonatos y la presencia de sulfatos (yeso, jarosita y goldichita), así como de óxidos y oxihidróxidos de hierro (hematites, goethita y akaganeita), cuarzo, feldespatos y filosilicatos. También es elevado el porcentaje de amorfos, sobre todo en las muestras B11 y B12 (Tabla 8.32).

La textura que presentan es arenosa o franco-arenosa (Tabla 8.33); al estar situadas en zonas de fuerte pendiente presentan una textura más gruesa que aquellas situadas en zonas deprimidas, y sometidas a una fuerte erosión hídrica que arrastra el material fino.

El contenido en elementos traza es muy elevado, con valores medios de 9994 mg kg^{-1} de cinc, 23039 mg kg^{-1} de plomo, 49 mg kg^{-1} de cadmio, 26% de hierro, 2038 mg kg^{-1} de arsénico, 521 mg kg^{-1} de cobre, 7165 mg kg^{-1} de manganeso y 336 mg kg^{-1} de mercurio (Tabla 8.34).

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (1:5) (dS/m)	% CaCO ₃	% M.O
B1	5,0	4,8	299	7,4	<ld	<ld
B7	3,3	3,0	339	2,8	<ld	<ld
B8	3,2	2,9	412	0,6	<ld	<ld
B11	5,2	4,7	240	4,2	<ld	<ld
B12	5,5	4,6	233	1,0	<ld	<ld
MEDIA	4,4	4,0	305	3,2	-	-

Tabla 8.30. Características generales de las muestras

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
B1	0,3	4	11	34	0,1	8	1	2	0,4	1	21	16,2
B7	0,4	1	11	29	0,1	9	1	1	0,3	0,2	22	20,5
B8	0,4	1	11	29	0,1	9	1	1	0,3	0,2	22	13,6
B11	0,2	3	5	25	0,1	4	0,3	1	0,2	1	42	15,2
B12	0,2	3	5	25	0,1	4	0,3	1	0,2	1	42	12,7
MEDIA	0,3	2,4	8,6	28,4	0,1	6,8	0,7	1,2	0,3	0,7	29,8	15,6

Tabla 8.31. Contenido en elementos mayoritarios

	Filo14	Filo10	Filo7	Fsp	Cuarzo	Yeso	Jar	Hem	Gt	Aka	Gol	Amorfo
B1	14	10	11	2	28	9	10	6		11		1
B7	7	8	5	2	13	8	28	5	4		14	7
B8	6	14	4	2	36		22	8	5			4
B11	5	8	4	6	19	10	11	10	12	6		11
B12	8	9	9	4	18	10	13	13	8			7
MEDIA	8,0	9,8	6,6	3,2	22,8	7,4	16,8	8,4	5,8	3,4	2,8	6,0

Tabla 8.32. Composición mineralógica

Filo: Filosilicatos; Fsp: Feldespatos; Jar: Jarosita; Hem: Hematites; Gt: Goethita; Aka: Akaganeita; Gol: Goldichita

	Seco				Húmedo			
	Arcilla	Limo	Arena		Arcilla	Limo	Arena	
	<2µm	2-50µm	50-2000µm		<2µm	2-50µm	50-2000µm	
B1	1	9	90	Arenosa	1	9	90	Arenosa
B7	9	31	60	Franco-arenosa	6	32	62	Franco-arenosa
B8	6	16	78	Franco-arenosa	9	31	60	Franco-arenosa
B11	0	2	98	Arenosa	1	5	94	Arenosa
B12	1	4	95	Arenosa	1	4	95	Arenosa
MEDIA	3	12	85	Areno-franca	4	16	80	Areno-franca

Tabla 8.33. Resultados del análisis granulométrico

	Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
B1	8984	3989	88	251465	752	142	4053	178
B7	8867	26847	44	170443	3466	999	1133	1
B8	9971	33804	39	173638	3211	434	1216	1099
B11	11553	31885	32	358595	1528	379	9242	302
B12	10595	18668	40	361251	1231	652	20182	101
MEDIA	9994	23039	49	263078	2038	521	7165	336

Tabla 8.34. Contenido de elementos traza

8.2.2. Contaminación secundaria.

Las muestras de la zona del Llano del Beal que sufren una contaminación secundaria presentan valores de pH ligeramente ácidos o neutros, superiores a los de las muestras afectadas por contaminación primaria (Tabla 8.35). Asimismo, y a diferencia de las muestras que sufren contaminación primaria, algunas de estas muestras presentan carbonato cálcico.

En este caso, la atenuación de la contaminación se produce no tanto por la influencia de los carbonatos, sino por la mezcla con la cubierta de filitas que forman la roca encajante, y que pueden retener parte de los elementos traza fijados a las arcillas.

Como en el caso de las muestras afectadas por contaminación primaria, los resultados del análisis de elementos mayoritarios muestra un elevado porcentaje de óxidos de hierro y aluminio, junto con SO_3 y sílice (Tabla 8.36).

La composición mineralógica de estas muestras se caracteriza por la presencia de sulfatos, como la jarosita, yeso y goldichita, aunque a diferencia de las muestras afectadas por contaminación primaria, las muestras B2 y B3 presentan carbonatos, debido a la mezcla con materiales circundantes, de origen carbonatado (Tabla 8.37).

El análisis granulométrico establece que presentan textura arenosa en húmedo y areno-franca en seco, debido al arrastre de la fracción fina por procesos de erosión y transporte (Tabla 8.38).

Finalmente, la Tabla 8.39 recoge las concentraciones totales de elementos traza. En general, presentan menor concentración que las muestras B1, B7, B8, B11 y B12, afectadas por contaminación primaria, pero todas presentan

influencia de las ramblas, que arrastran carbonatos y elementos traza procedentes de las balsas de estériles de la Sierra Minera.

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (1:5) (dS/m)	% CaCO ₃	%M.O
B2	7,4	7,1	136	2,8	10,1	<ld
B3	7,8	7,5	178	2,9	1,0	<ld
B4	6,9	6,4	282	1,4	1,0	1,0
B5	6,6	6,4	255	1,7	1,3	<ld
B6	5,3	4,5	215	0,5	<ld	1,0
MEDIA	6,8	6,4	213	1,9	2,7	0,6

Tabla 8.35. Características generales de las muestras

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
B2	0,4	4	10	36	0,1	5	1	6	0,4	1	26	10,1
B3	1,0	2	10	35	0,1	10	1	6	1	0,5	21	10,7
B4	1,0	2	9	35	0,1	10	1	4	1	1	26	9,7
B5	1,0	2	9	35	0,1	10	1	4	1	1	26	12,6
B6	0,4	1	11	41	0,2	5	1	1	1	0,2	23	12,8
MEDIA	0,8	2,2	9,8	36,4	0,1	8,0	1,0	4,2	0,9	0,7	24,4	11,2

Tabla 8.36. Contenido en elementos mayoritarios

	Filo14	Filo10	Filo7	Fsp	Cuarzo	Yeso	Jar	Hem	Cal	Gt	Aka	Gol	Amorfo
B2	10	10	8	2	29	6		7	14		12		2
B3		9	4	3	34	13	8	3	6		14	4	2
B4		7	5	4	30	14	11	2		4	14	6	3
B5		10	5	2	33	9	11	3		6	12	7	2
B6		12	3	2	32	7	14	4		8	11	6	2
MEDIA	2,0	9,6	5,0	2,6	31,6	9,8	8,8	3,8	4,0	3,6	12,6	4,6	2,0

Tabla 8.37. Composición mineralógica

Filo: Filosilicatos; Fsp: Feldespatos; Jar: Jarosita; Hem: Hematites; Gt: Goethita; Aka: Akaganeita; Gol: Goldichita

	Seco				Húmedo			
	Arcilla	Limo	Arena		Arcilla	Limo	Arena	
	<2µm	2-50µm	50-2000µm		<2µm	2-50µm	50-2000µm	
B2	2	16	82	Areno-franca	1	9	90	Arenosa
B3	2	13	85	Areno-franca	0	4	96	Arenosa
B4	2	14	84	Areno-franca	1	3	96	Arenosa
B5	1	10	89	Areno-franca	0	2	98	Arenosa
B6	1	11	88	Areno-franca	1	4	95	Arenosa
MEDIA	2	13	85	Areno-franca	1	4	95	Arenosa

Tabla 8.38. Resultados del análisis granulométrico

	Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
B2	3153	1241	123	261084	669	123	3498	159
B3	7958	3621	34	192308	454	124	3537	404
B4	7062	4741	19	245292	561	127	3767	16
B5	7239	6757	20	242278	530	145	3378	14
B6	4000	13500	15	192500	644	185	1390	413
MEDIA	5882	5972	42	226692	572	141	3114	201

Tabla 8.39. Contenido de elementos traza

8.2.3. Contaminación terciaria.

Las muestras afectadas por contaminación terciaria presentan pH neutros o ligeramente alcalinos, baja conductividad eléctrica y escaso o nulo contenido en materia orgánica. Además, todas presentan carbonato cálcico, debido al arrastre a lo largo de la rambla de carbonatos, tanto en forma particulada como solubles (Tabla 8.40).

Al estudiar la composición mineralógica se observa que, junto con los productos procedentes de la alteración (jarosita, goethita, akaganeita, etc) todas presentan calcita, dolomita y filosilicatos, por lo que ha existido una mezcla entre los materiales transportados desde las balsas y los suelos que atraviesan al ser transportados (Tabla 8.42).

Los resultados del análisis granulométrico están recogidos en la Tabla 8.43 y muestra como la textura de estos sedimentos es, como en las anteriores, arenosa y areno-franca.

La concentración de elementos traza es elevada, superando en algunos casos los valores obtenidos en puntos afectados por contaminación secundaria (Tabla 8.44).

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (1:5) (dS/m)	% CaCO ₃	% M.O
B9	6,4	6,2	300	1,2	15,4	<ld
B10	8,2	7,6	215	2,2	21,1	<ld
B13	8,0	7,7	212	0,5	4,5	<ld
B14	7,8	7,7	238	0,7	3,9	<ld
B15	8,1	7,4	220	1,0	1,8	1,2
B16	8,1	7,3	177	0,8	7,2	0,9
B17	8,2	7,6	265	1,0	4,2	<ld
MEDIA	7,8	7,4	232	1,1	8,3	0,3

Tabla 8.40. Características generales de las muestras

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
B9	0,3	3	13	36	0,1	4	1	5	0,4	1	24	9,1
B10	0,3	3	13	36	0,1	4	1	5	0,4	1	24	8,6
B13	0,3	2	12	43	0,1	2	1	4	0,4	1	23	9,0
B14	0,3	2	12	43	0,1	2	1	4	0,4	1	23	6,5
B15	0,3	2	13	43	0,1	3	1	2	0,4	0,5	23	8,1
B16	1,0	2	12	46	0,1	2	1	5	0,4	1	20	7,6
B17	1,0	2	12	45	0,1	3	1	4	0,5	1	21	8,1
MEDIA	0,5	2,3	12,4	41,7	0,1	2,9	1,0	4,1	0,4	0,9	22,6	8,1

Tabla 8.41. Contenido en elementos mayoritarios

	Filo14	Filo10	Filo7	Fsp	Cuarzo	Yeso	Jar	Hem	Cal	Dol	Gt	Aka	Alu	Gol	Am
B9	7	10	6	3	27	8	7	5	11		5	9			2
B10		10	6	2	31	5	5	7	11	2	6	13			3
B13		14	5	2	44			3	3	4			23		3
B14		14	5	2	44			3	3	4			23		3
B15		14	9	4	25	13	7	5	3	8				10	2
B16	6	13	6	3	24	9	7	3	8	10				11	2
B17	9	14	6	6	29	17	8	3	3	4					2
MEDIA	3,1	12,9	6,1	3,1	32,0	7,4	4,9	4,1	6,0	4,6	1,6	3,1	6,6	3,0	2,4

Tabla 8.42. Composición mineralógica

Filo: Filosilicatos; Jar: Jarosita; Hem: Hematites; Gt: Goethita; Aka: Akaganeita; Alu: Alunita; Gol: Goldichita; Fsp: Feldespatos; Cal: Calcita; Dol: Dolomita

	Seco				Húmedo			
	Arcilla	Limo	Arena		Arcilla	Limo	Arena	
	<2µm	2-50µm	50-2000µm		<2µm	2-50µm	50-2000µm	
B9	1	3	96	Arenosa	0	2	98	Arenosa
B10	2	8	90	Arenosa	0	2	98	Arenosa
B13	0	0	100	Arenosa	1	7	92	Arenosa
B14	0	0	100	Arenosa	1	5	94	Arenosa
B15	0	29	71	Areno-franca	0	30	70	Areno-franca
B16	0	1	99	Arenosa	0	4	96	Arenosa
B17	1	7	92	Arenosa	0	3	97	Arenosa
MEDIA	1	7	92	Arenosa	0	8	92	Arenosa

Tabla 8.43. Resultados del análisis granulométrico

	Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
B9	7472	2016	43	183112	1417	658	11860	271
B10	10088	2618	44	160965	1243	217	10965	274
B13	3107	3251	32	42304	107	30	23901	<ld
B14	14216	3431	39	176471	164	275	9804	1590
B15	8458	3577	45	149751	1019	472	3731	186
B16	7730	4092	44	151208	587	267	9662	748
B17	6466	4612	34	111111	2600	206	3592	13
MEDIA	8220	3371	40	139275	1020	304	10502	440

Tabla 8.44. Contenido de elementos traza

8.2.4. Muestras con origen diferente.

En los puntos B18, B19, B20 y B21 se ha muestreado la capa arable de Xerosoles cálcicos dedicados a la agricultura. Los valores de pH son básicos, además de presentar elevado porcentaje de carbonato cálcico y los mayores valores de materia orgánica de la zona (Tabla 8.45).

El análisis químico total muestra que los mayores porcentajes corresponden a SiO₂, CaO y en menor medida Fe₂O₃ y Al₂O₃, similar a la que presentan otros suelos con el mismo origen y uso (Tabla 8.46).

La composición mineralógica muestra que principalmente están compuestos por calcita y dolomita, cuarzo, feldespatos y filosilicatos (Tabla 8.47) y su textura es fundamentalmente areno-franca, aunque han perdido elementos finos por erosión superficial (Tabla 8.48).

Finalmente, la concentración de elementos traza es elevada, con valores superiores a suelos similares del Campo de Cartagena que no reciben aportes de la zona minera, lo que lleva a pensar que estos suelos están teniendo una influencia a través de las aguas de escorrentía de la zona minera situada topográficamente más elevada (Tabla 8.49).

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (1:5) (dS/m)	% CaCO ₃	% M.O
B18	8,3	8,0	213	0,6	15,1	1,5
B19	7,9	8,0	138	0,8	41,5	1,7
B20	8,2	7,9	146	0,1	30,4	1,9
B21	8,5	8,0	142	0,5	6,5	1,6
MEDIA	8,2	8,0	160	0,5	23,4	1,7

Tabla 8.45. Características generales de las muestras

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
B18	0,3	2	12	43	0,2	0	2	17	1	0,2	6	16,3
B19	0,3	3	12	43	0,2	1	2	13	1	1	10	14,0
B20	0,3	2	12	43	0,2	0	2	17	1	0,2	6	14,1
B21	0,3	3	12	43	0,2	1	2	13	1	1	10	14,2
MEDIA	0,3	2,5	12,0	43,0	0,2	0,5	2,0	15,0	1,0	0,6	8,0	14,7

Tabla 8.46. Contenido en elementos mayoritarios

	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Cal	Dol	Amorfo
B18	13	2	15	34	27	9	1
B19	13	3	15	33	27	7	2
B20	12	2	14	33	31	7	2
B21	14	4	14	35	24	7	2
MEDIA	13,0	2,8	14,5	33,8	27,3	7,5	1,8

Tabla 8.47. Composición mineralógica

Filo: Filosilicatos; Hem: Hematites; Fsp: Feldespatos; Cal: Calcita; Dol: Dolomita

	Seco				Húmedo			
	Arcilla	Limo	Arena		Arcilla	Limo	Arena	
	<2µm	2-50µm	50-2000µm		<2µm	2-50µm	50-2000µm	
B18	2	10	88	Areno-franca	4	22	74	Areno-franca
B19	1	6	93	Arenosa	3	22	75	Areno-franca
B20	0	3	97	Arenosa	2	3	95	Arenosa
B21	1	8	91	Arenosa	2	8	90	Arenosa
MEDIA	1	7	92	Arenosa	3	14	83	Areno-franca

Tabla 8.48. Resultados del análisis granulométrico

	Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
B18	851	118	17	44685	200	22	1834	<ld
B19	3247	465	18	1419	200	44	3247	<ld
B20	2745	376	33	84075	297	99	4327	<ld
B21	2388	392	34	64470	258	40	3534	<ld
MEDIA	2308	338	25	48662	239	51	3235	-

Tabla 8.49. Contenido de elementos traza

8.2.5. Punto de muestreo control.

La muestra tomada como control en la zona presenta valores de pH básicos, contenido en carbonato cálcico elevado (42%) y un porcentaje de materia orgánica del 1,5% (Tabla 8.50), mostrando características similares al suelo control de la zona de Lo Poyo. Mineralógicamente, la muestra está formada por carbonatos (calcita y dolomita), filosilicatos, cuarzo y feldespatos (Tabla 8.52). La textura es areno-franca (Tabla 8.53) y el contenido en elementos traza

es muy bajo, debido a valores geogénicos y no a una influencia de la actividad minera (Tabla 8.54).

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (1:5) (dS/m)	% CaCO ₃	%M.O
SCB	8,6	8,3	164	0,8	42	1,5

Tabla 8.50. Características generales de las muestras

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
SCB	0,3	2	9	45	0,2	0,5	1,5	18	1	0,2	6	16,3

Tabla 8.51. Contenido en elementos mayoritarios

	Filo14	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Cal	Dol	Amorfo
SCB	2	11	2	15	34	28	8	1

Tabla 8.52. Composición mineralógica

Filo: Filosilicatos; Hem: Hematites; Fsp: Feldespatos; Cal: Calcita; Dol: Dolomita

	Seco				Húmedo			
	Arcilla	Limo	Arena		Arcilla	Limo	Arena	
	<2µm	2-20µm	20-2000µm		<2µm	2-20µm	20-2000µm	
SCB	1	11	88	Areno-franca	4	23	73	Areno-franca

Tabla 8.53. Resultados del análisis granulométrico

	Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
SCB	30	10	0,6	808	8	16	197	0,1

Tabla 8.54. Contenido de elementos traza

8.2.6. Análisis estadístico.

La Tabla 8.55 recoge los resultados del análisis de correlaciones entre los elementos traza, las características analíticas generales y la textura de las muestras de la zona del Llano del Beal.

En ella se observa la correlación negativa existente entre cinc y hierro y el contenido en carbonato cálcico, esto es, la presencia de carbonato cálcico en el sedimento se corresponde con suelos en los que el contenido total de estos elementos es menor. Además, el plomo está positivamente correlacionado con la

fracción arcilla, por lo que el transporte de este metal va ligado a la fracción más fina. Por otro lado, el cadmio y el hierro están positivamente correlacionados con la conductividad eléctrica, y por ello, con las sales solubles, principalmente en forma de cloruros o sulfatos. Finalmente, el pH también es un factor relevante, ya que la concentración de plomo, hierro, arsénico y cobre es menor en los puntos con pH elevado.

En cuanto a los elementos traza, el plomo y el cinc están positivamente correlacionados con el hierro y el cobre, el plomo con el hierro y el arsénico con el cobre.

La Tabla 8.56 muestra los resultados del análisis de correlaciones entre los elementos traza y la mineralogía de los sedimentos. En ella se observa como el contenido en cadmio, hierro y arsénico se correlacionan positivamente con los filosilicatos a 14Å y 7Å.

Además, el contenido en hierro, plomo, arsénico, cobre y manganeso está positivamente correlacionado con sulfatos (yeso, jarosita y alunita), esto es, los sedimentos con elevado porcentaje de estos minerales son los que presentan mayores concentraciones de estos elementos traza. Por otro lado, el cinc, el hierro, el plomo, el arsénico y el cobre también están positivamente correlacionados con los óxidos y oxihidróxidos de hierro (hematites, goethita y akaganeita).

De acuerdo a lo obtenido en la Tabla 8.55 el contenido de cinc, hierro y plomo está inversamente correlacionado con la calcita y la dolomita, minerales presentes en los sedimentos afectados por contaminación terciaria y en los que al tener lugar una atenuación de la contaminación el contenido en estos elementos traza es menor.

Por último, es de destacar la relación que existe entre el cinc, el plomo, el hierro y el cobre y el porcentaje de amorfos en las muestras y que el mercurio no muestra correlación con ningún mineral.

En la Tabla 8.57 se muestra la matriz de correlación de Pearson para el contenido total en elementos traza y el análisis químico total. Es de destacar la correlación positiva entre el cinc, el plomo, el hierro y el arsénico y los óxidos de hierro, así como el plomo y el hierro también lo están con los óxidos de aluminio.

Por otro lado, el hierro está positivamente correlacionado con el SO_3 , que verifica lo obtenido en la Tabla 8.56, en la que el contenido en este metal estaba correlacionado con los sulfatos.

El CaO está negativamente correlacionado con el cinc, el plomo, el hierro, el arsénico y el cobre, ya que, al igual que en el análisis de correlaciones con la mineralogía, el contenido total de estos elementos es menor en los puntos donde la concentración de carbonato cálcico es mayor.

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh	CE	CaCO ₃	MO	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Hg	Arcilla	Limo
pH KCl	0,99*															
Eh	-0,77*	-0,75*														
CE	-0,39	-0,36	0,24													
CaCO ₃	0,49	0,54**	-0,52**	-0,29												
MO	0,22	0,17	-0,25	-0,19	0,04											
Zn	-0,46	-0,48	0,55**	0,35	-0,55**	-0,45										
Pb	-0,85*	-0,87*	0,64*	0,18	-0,46	-0,20	0,51**									
Cd	-0,17	-0,16	0,02	0,55**	-0,27	-0,16	0,20	-0,03								
Fe	-0,56**	-0,60*	0,35	0,51**	-0,64*	-0,19	0,67*	0,52**	0,41							
As	-0,69*	-0,70*	0,75*	0,15	-0,37	-0,26	0,44	0,73*	0,15	0,28						
Cu	-0,65*	-0,67*	0,59**	0,10	-0,36	-0,18	0,57**	0,62*	0,14	0,44	0,73*					
Mn	0,09	0,05	-0,04	-0,09	-0,16	-0,39	0,28	0,01	0,07	0,21	-0,14	0,15				
Hg	-0,19	-0,18	0,29	-0,09	-0,27	-0,22	0,60*	0,26	0,09	0,18	0,11	0,15	0,06			
Arcilla	-0,49	-0,44	0,43	-0,14	0,14	0,11	-0,13	0,51**	-0,15	-0,27	0,46	0,22	-0,38	0,14		
Limo	-0,27	-0,24	0,26	-0,08	0,16	0,28	-0,14	0,30	-0,07	-0,36	0,36	0,28	-0,43	-0,01	0,76*	
Arena	0,33	0,28	-0,30	0,09	-0,17	-0,26	0,15	-0,35	0,09	0,36	-0,39	-0,28	0,44	-0,01	-0,83*	-0,99*

Tabla 8.55. Matriz de correlación de Pearson entre el contenido total de elementos traza, características analíticas generales y granulometría de los sedimentos.

(**) p<0,05; (*) p<0,01

	Filo 14	Filo 10	Filo 7	Fsp	Cuarz	Yeso	Jaros	Hemat	Cal	Dol	Goet	Aka	Alu	Goldi	Amorf
Filo 10	-0,22														
Filo 7	0,64*	-0,16													
Fsp	-0,34	0,26	-0,58**												
Cuarz	-0,51**	0,57**	-0,38	0,17											
Yeso	0,34	-0,45	0,51**	-0,49	-0,56**										
Jaros	0,36	-0,41	0,18	-0,53**	-0,58**	0,42									
Hemat	0,54**	-0,39	0,59**	-0,61*	-0,53**	0,36	0,51**								
Cal	-0,32	0,29	-0,53**	0,88*	0,28	-0,61*	-0,68*	-0,63*							
Dol	-0,37	0,63*	-0,31	0,67*	0,24	-0,39	-0,59**	-0,63*	0,67*						
Goet	0,07	-0,52**	0,00	-0,35	-0,45	0,25	0,55**	0,66*	-0,48	-0,62*					
Aka	0,04	-0,62*	0,21	-0,46	-0,03	0,43	0,11	0,18	-0,31	-0,65*	0,32				
Alu	-0,25	0,37	-0,02	-0,23	0,60*	-0,37	-0,31	-0,10	-0,18	0,07	-0,24	-0,25			
Goldi	-0,08	-0,21	0,11	-0,35	-0,47	0,43	0,53**	-0,05	-0,38	0,02	0,05	0,04	-0,20		
Amorf	0,19	-0,47	0,05	-0,23	-0,57**	0,19	0,51**	0,67*	-0,43	-0,42	0,72*	-0,11	0,00	0,08	
Zn	0,26	-0,25	0,47	-0,67*	-0,29	0,39	0,49	0,65*	-0,72*	-0,48	0,44	0,15	0,18	0,17	0,53**
Pb	0,29	-0,29	0,00	-0,35	-0,47	0,13	0,81*	0,65*	-0,55**	-0,51**	0,70*	-0,11	-0,14	0,19	0,81*
Cd	0,67*	-0,13	0,70*	-0,43	-0,21	0,16	0,00	0,43	-0,19	-0,31	-0,18	0,27	-0,03	-0,08	-0,02
Fe	0,45	-0,64*	0,54**	-0,64*	-0,52**	0,57**	0,59**	0,81*	-0,69*	-0,74*	0,67*	0,50**	-0,18	0,12	0,59**
As	0,50**	-0,14	0,18	-0,38	-0,53**	0,33	0,81*	0,50**	-0,47	-0,43	0,37	-0,13	-0,27	0,25	0,48
Cu	0,39	-0,29	0,33	-0,44	-0,70*	0,32	0,73*	0,58**	-0,48	-0,38	0,44	-0,16	-0,13	0,44	0,58**
Mn	0,04	0,02	0,31	-0,31	0,05	-0,03	-0,17	0,41	-0,26	-0,10	0,19	-0,12	0,56**	-0,24	0,31
Hg	0,00	0,30	0,02	-0,41	0,30	-0,17	0,11	0,20	-0,32	-0,08	0,04	-0,09	0,42	-0,02	0,07

Tabla 8.56. Matriz de correlación de Pearson entre el contenido total de elementos traza y la composición mineralógica de los sedimentos. (***) p<0,05; (*) p<0,01

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000C
MgO	-0,28											
Al ₂ O ₃	0,00	-0,16										
SiO ₂	0,14	-0,14	0,67*									
P ₂ O ₅	-0,32	-0,11	0,17	0,49								
SO ₃	0,47	-0,16	-0,28	-0,63*	-0,57**							
K ₂ O	-0,13	-0,05	0,55**	0,64*	0,80*	-0,49						
CaO	-0,16	0,08	0,23	0,57**	0,79*	-0,62*	0,86*					
TiO ₂	0,28	-0,20	0,13	0,46	0,72*	-0,09	0,70*	0,67*				
MnO	0,17	0,66*	-0,12	-0,07	-0,46	0,01	-0,32	-0,29	-0,30			
Fe ₂ O ₃	0,04	0,18	-0,62*	-0,73*	-0,73*	0,44	-0,94*	-0,83*	-0,65*	0,45		
1000C	-0,34	-0,08	-0,30	-0,35	0,44	0,11	0,27	0,27	0,20	-0,51**	-0,24	
Zn	0,06	0,00	-0,23	-0,56**	-0,75*	0,44	-0,72*	-0,75*	-0,66*	0,32	0,70*	-0,28
Pb	-0,14	-0,34	-0,52**	-0,76*	-0,32	0,43	-0,55**	-0,58**	-0,50**	-0,23	0,57**	0,39
Cd	-0,13	0,60*	0,06	-0,24	-0,46	0,19	-0,26	-0,32	-0,52**	0,32	0,27	-0,14
Fe	0,09	0,26	-0,66*	-0,79*	-0,63*	0,57*	-0,82*	-0,72*	-0,48	0,33	0,88*	-0,07
As	0,05	-0,31	-0,05	-0,53**	-0,44	0,43	-0,40	-0,54**	-0,56**	-0,19	0,34	0,21
Cu	-0,17	-0,20	-0,15	-0,58**	-0,47	0,31	-0,52**	-0,57**	-0,64*	-0,11	0,50**	0,16
Mn	-0,22	0,24	-0,17	-0,15	-0,39	-0,22	-0,44	-0,29	-0,51**	0,52**	0,49	-0,42
Hg	0,00	-0,24	0,12	-0,03	-0,30	0,08	-0,27	-0,34	-0,35	0,00	0,18	-0,39

Tabla 8.57. Matriz de correlación de Pearson entre el contenido total de elementos traza y los elementos mayoritarios.
(**) p<0,05; (*) p<0,01

Además del análisis de correlaciones se ha realizado un análisis de componentes principales en esta zona, cuyas puntuaciones factoriales vienen recogidas en la Tabla 8.58, agrupándose las variables en 4 factores del siguiente modo:

- F1: pH tanto en agua como en KCl, Al_2O_3 , cuarzo, sílice y dolomita en la parte negativa y Fe_2O_3 , jarositas, hematites, goethita, amorfos, plomo, arsénico y cobre en la parte positiva del factor.
- F2: en la parte negativa de este factor se agrupan la conductividad eléctrica, el MgO y MnO, los filosilicatos a 14 y 7Å y la akaganeita, junto con el cadmio y el hierro, mientras que en la parte positiva lo hacen los filosilicatos a 10 Å.
- F3: incluye la alunita, el cinc, el manganeso y el mercurio en su parte positiva.
- F4: este factor agrupa en su parte negativa el contenido en carbonato cálcico, el porcentaje de calcita y de CaO junto con los feldespatos y en la positiva el SO_3 , el yeso y la goldichita, es decir los sulfatos presentes en las muestras.

La representación gráfica de las puntuaciones factoriales de cada punto se muestra en la Figura 8.3.

En primer lugar, la representación del F1 y el F2 agrupa los puntos de muestreo afectados por contaminación primaria en el primer y cuarto cuadrantes, esto es, elevada concentración de elementos traza y de óxidos y oxihidróxidos de hierro. Los puntos B18, B19, B20 y B21, junto con el suelo control de la zona aparecen en el segundo cuadrante, correspondiendo a valores de pH altos, junto con elevado porcentaje de cuarzo, filosilicatos y óxidos de aluminio. El resto de puntos aparecen en el tercer y cuarto cuadrantes.

La representación de F1 y F3 muestra como vuelven a agruparse los sedimentos afectados por contaminación primaria en el primer y cuarto cuadrantes, definidos por el contenido total en plomo, arsénico y cobre, junto con los óxidos de hierro, las jarositas y los amorfos. En el cuarto cuadrante aparecen los puntos afectados por contaminación terciaria.

El gráfico resultante de los factores F1 y F4, al igual que en el caso anterior, agrupa las muestras afectadas por contaminación primaria en los

cuadrantes 1 y 4, las afectadas por contaminación secundaria y terciaria en el segundo cuadrante y las que tienen un origen diferente en el tercero, al ir descendiendo a lo largo del eje aumenta el contenido en carbonatos y disminuyen los sulfatos. Todas tienen en común que los pH son más elevados que los sedimentos directamente afectados por las balsas, así como presentan mayor contenido en cuarzo.

	F1	F2	F3	F4
pH H ₂ O	-0,871	-0,012	-0,076	-0,247
pH KCl	-0,893	0,003	-0,080	-0,268
Eh	0,620	0,139	0,314	0,421
CE	0,256	-0,648	-0,137	0,206
CaCO ₃	-0,356	0,205	-0,378	-0,603
MO	-0,154	0,197	-0,502	0,051
Na ₂ O	-0,257	-0,004	-0,126	0,767
MgO	-0,191	-0,847	-0,112	-0,376
Al ₂ O ₃	-0,572	0,390	0,226	0,109
SiO ₂	-0,848	0,388	0,028	-0,100
P ₂ O ₅	-0,277	0,494	-0,545	-0,494
SO ₃	0,411	-0,206	-0,086	0,777
K ₂ O	-0,557	0,495	-0,414	-0,337
CaO	-0,523	0,326	-0,511	-0,537
TiO ₂	-0,496	0,364	-0,660	0,069
MnO	-0,228	-0,713	0,326	-0,018
Fe ₂ O ₃	0,591	-0,575	0,359	0,206
Filo 14	0,380	-0,499	0,091	0,057
Filo 10	-0,475	0,496	0,450	-0,249
Filo 7	0,095	-0,700	0,321	0,245
Feldespatos	-0,296	0,357	-0,540	-0,630
Cuarzo	-0,661	0,285	0,283	-0,101
Yeso	0,192	-0,436	-0,084	0,657
Jarosita	0,815	0,145	0,021	0,520
Hematites	0,715	-0,525	0,319	0,001
Calcita	-0,475	0,264	-0,478	-0,630
Dolomita	-0,566	0,436	-0,055	-0,400
Goethita	0,769	-0,175	-0,034	0,033
Akaganeita	-0,036	-0,548	-0,296	0,521
Alunita	-0,287	0,089	0,762	-0,151
Goldichita	0,177	0,250	-0,083	0,645
Amorfo	0,820	-0,173	0,156	-0,182
Zn	0,474	-0,283	0,569	0,299
Pb	0,932	0,129	0,159	0,078
Cd	0,007	-0,643	0,181	0,068
Fe	0,587	-0,635	0,097	0,298
As	0,719	0,151	0,179	0,268
Cu	0,746	0,022	0,251	0,148
Mn	0,030	-0,370	0,609	-0,307
Hg	0,071	0,178	0,658	0,131
Varianza (%)	41	12	9	13

Tabla 8.58. Factores obtenidos tras el análisis de componentes principales entre composición química, composición mineralógica, características analíticas generales y concentración de elementos traza

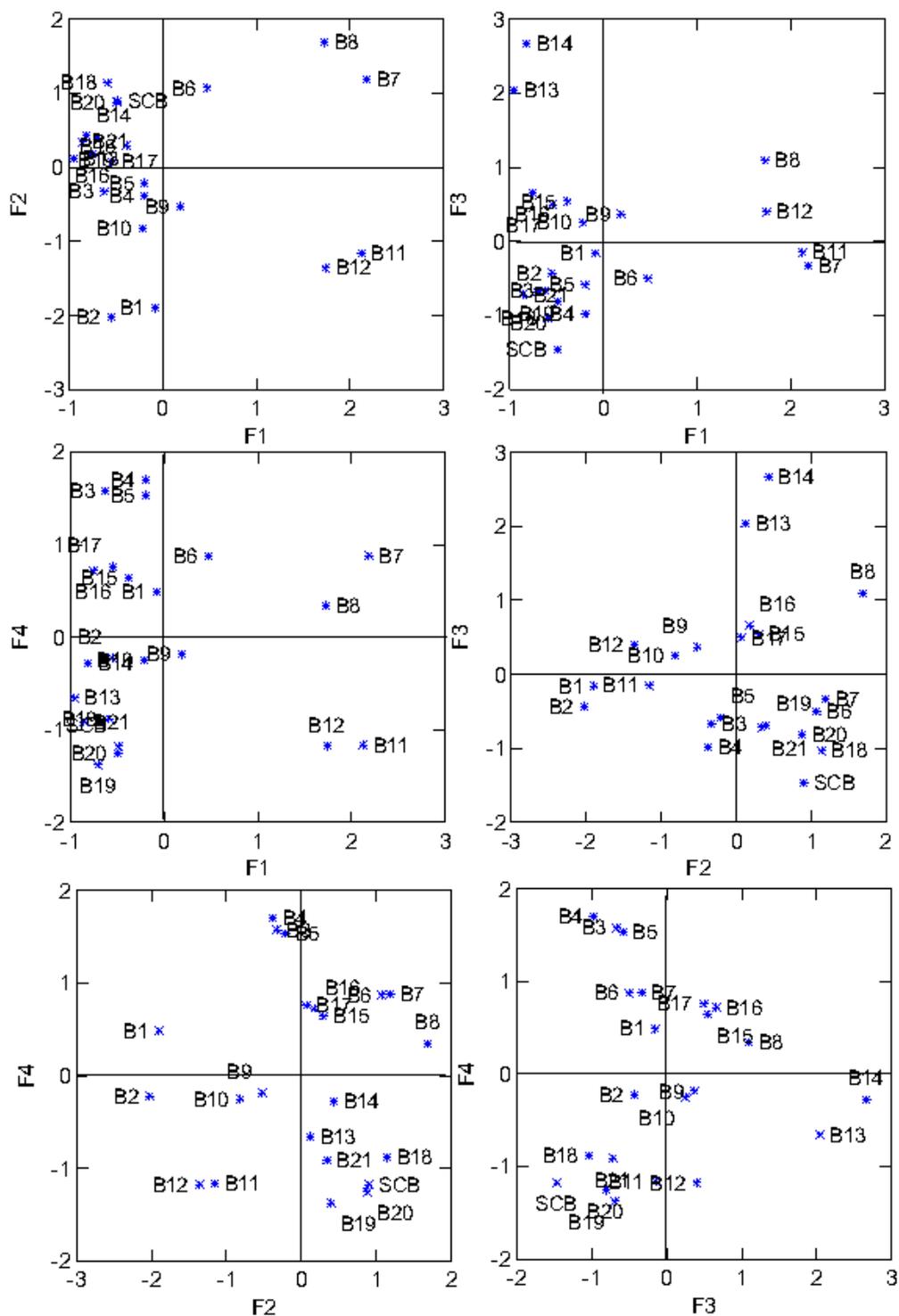


Figura 8.3. Representación gráfica de los factores obtenidos

8.2.7. Modelo conceptual de dispersión hídrica de la contaminación.

En esta zona existe un flujo de elementos traza, que provienen de las balsas de estériles de flotación y escombreras de la Sierra Minera (Figura 8.4). Estos aportes son transportados a través de las ramblas principalmente, aunque también existe un transporte de ladera.

Además del flujo de elementos traza existe un flujo de carbonatos, en forma soluble y particulada, que actúa como atenuante de la contaminación.

Finalmente, también existe un flujo de arcillas, procedentes de las filitas de la roca encajante, que aunque de menor magnitud, también atenúa la contaminación.

En ambos casos, durante el transporte, el material se mezcla con la cubierta de filitas que constituye la roca encajante (contaminación secundaria) y con material carbonatado (contaminación terciaria).

Por último, las muestras localizadas sobre Xerosoles cálcicos (B18, B19, B20 y B21) presentan influencia de la actividad minera.

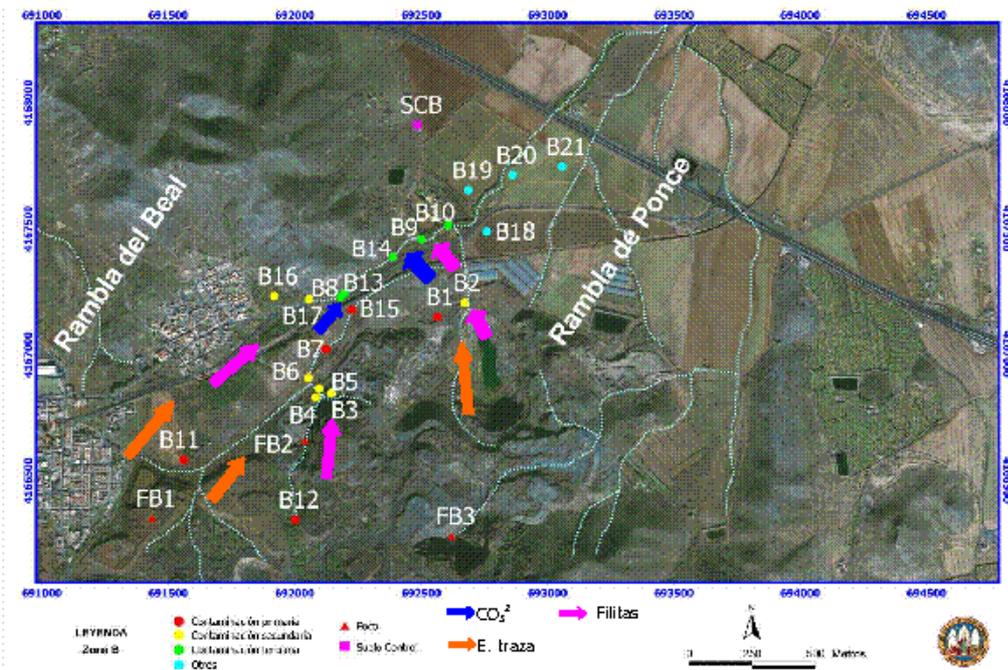


Figura 8.4. Cuadro resumen de los flujos en la zona del Llano del Beal

8.3. Zona C (Cabezo Rajao).

8.3.1. Contaminación primaria.

En esta zona, todos los puntos de muestreo sufren contaminación primaria, debida a su cercanía a las balsas de estériles de la Sierra Minera. En ellas no se está produciendo una atenuación natural por mezcla con los materiales circundantes, por lo que estos puntos pueden actuar como focos de contaminación.

La muestra C1 no recibe los aportes de las balsas y escombreras del Cabezo Rajao y balsas cercanas al Cabezo Rajao, sino que está afectada por las aguas de escorrentía y los materiales procedentes de la mina Brunita, situada al sureste del Cabezo Rajao. A este punto llegan las sales solubles procedentes de la disolución de sales hidratadas, formadas en la parte superficial de las balsas que están situadas en zonas topográficamente más elevadas.

El sedimento recogido tiene valores de pH cercanos a la neutralidad, debido a las filitas procedentes de la roca encajante (Tabla 8.59). El contenido en elementos traza es muy elevado, y es de destacar la elevada concentración de arsénico (Tabla 8.63). En su composición mineralógica destaca la presencia de jarositas, yeso y otros sulfatos, junto con óxidos de hierro, cuarzo y feldespatos (Tabla 8.61).

Es el sedimento que presenta la textura más fina, por ser un punto de recepción de todos los materiales finos transportados desde áreas topográficamente más elevadas (Tabla 8.62).

El resto de puntos de muestreo están localizados en la zona de influencia del Cabezo Rajao y sus inmediaciones.

El pH del sedimento C2 es neutro, aunque los restantes presentan valores de pH ácidos. Todos presentan una composición mineralógica similar, sulfatos, óxidos de hierro, amorfos, cuarzo, feldespatos y filosilicatos (Tabla 8.61).

La textura del punto C2 es franco-limosa en seco y limosa en húmedo, que denota que es un lugar de recepción de materiales procedentes de zonas topográficamente más elevadas, en las que se ha depositado la fracción más fina

(Tabla 8.62). El contenido en elementos traza es elevado, aunque inferior al sedimento C1 en arsénico y hierro (Tabla 8.63). En este sedimento se ha cuantificado dolomita en su composición mineralógica, debido a que está influida por una balsa cubierta con material carbonatado.

El sedimento recogido en el punto C3 presenta características similares al C1 y C2, con la diferencia de que tiene un pH ácido. Al igual que las anteriores es una muestra con composición química y mineralógica similar a las balsas de estériles de flotación (focos) ya que la distancia entre estos focos y el punto de muestreo es escasa. Es de destacar la presencia de sales hidratadas y solubles de elementos traza, de manera que estos puntos actúan como focos de contaminación por la movilidad de estas fases solubles.

Los sedimentos recogidos en los puntos C4, C5 y C7 son también similares entre sí: muestras con pH ácido, sin carbonatos, elevadas concentraciones de sulfatos, sales solubles y elementos traza. Al igual que la C3 la cercanía de estos puntos con el foco no ha permitido que haya tenido lugar un proceso de atenuación natural (Tablas 8.59 y 8.63).

El punto de muestreo C6 se localiza en una zona con elevada pendiente, en la que prevalecen los fenómenos de transporte. Es una zona de compensación, que recibe pero a la vez exporta material, tanto soluble como en forma particulada. La textura arenosa de la muestra confirma que la parte fina ha sido arrastrada (Tabla 8.62). En su composición mineralógica destaca la presencia de rocas volcánicas, por el elevado porcentaje de cuarzo y feldespatos (Tabla 8.61). Las concentraciones de elementos traza son ligeramente inferiores al resto de sedimentos (Tabla 8.63).

Finalmente, el punto de muestreo C8 está localizado en una zona de pie de monte, de recogida, por lo que su textura es ligeramente más fina que la C6 (franco-arenosa), su pH es más ácido y la concentración en elementos traza es elevada.

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (dS/m)	% CaCO ₃	% M.O
C1	7,4	7,1	114	1,8	<ld	<ld
C2	7,6	7,5	189	2,6	<ld	<ld
C3	4,5	4,4	278	7,3	<ld	<ld
C4	3,3	3,1	377	4,0	<ld	<ld
C5	5,1	4,8	246	3,4	<ld	<ld
C6	6,5	6,2	180	1,7	<ld	<ld
C7	3,6	3,1	385	2,8	<ld	<ld
C8	4,9	4,6	246	3,4	<ld	<ld
MEDIA	5,4	5,2	252,7	3,4	-	-

Tabla 8.59. Características generales de las muestras

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
C1	0,4	2	13	41	0,1	3	1	2	0,4	1	23	10,5
C2	0,3	3	14	32	0,1	5	1	5	0,4	1	21	15,2
C3	0,3	2	11	26	0,3	12	1	2	0,4	0,2	18	22,0
C4	1	2	11	33	0,3	8	1	2	0,3	0,1	13	12,8
C5	0,3	2	14	29	0,3	11	1	4	0,5	0,1	17	17,3
C6	0,2	2	14	44	0,3	4	1	2	0,5	0,2	14	7,1
C7	1	2	15	47	0,4	6	1	1	0,4	0,1	15	10,4
C8	0,3	2	14	29	0,3	11	1	4	0,5	0,1	17	17,3
MEDIA	0,5	2,1	13,1	36,0	0,3	7,0	1,0	2,6	0,4	0,4	17,3	13,6

Tabla 8.60. Contenido en elementos mayoritarios

	Filo14	Filo10	Filo7	Fsp	Cuarzo	Yeso	Jar	Hem	Hex	Gt	Aka	Alu	Gol	Dol	ZnSO ₄	Am
C1	6	16	12	3	34	9	7	5		6						3
C2		7	10	12	19	8	11	3	2	3	5			10	5	5
C3		8	6		23	10	28	4	4	4	4				4	8
C4	4		4	11	20	24	11	3		4	18					2
C5	4	4	3	4	6	26	16	2		2	24		6			3
C6	8	8	6	6	34	18	8	1		2	2		5			2
C7	7	8	6	8	38	15	5	3		4	2	3				2
C8	4	4	3	4	6	26	16	2		2	24		6			3
MEDIA	4,1	7,1	6,8	4,5	22,1	17,3	13,4	3,0	0,9	3,6	11,1	0,4	2,1		1,4	3,0

Tabla 8.61. Composición mineralógica

Filo: Filosilicatos; Jar: Jarosita; Hem: Hematites; Gt: Goethita; Aka: Akaganeita; Alu:

Alunita; Gol: Goldichita; Fsp: Feldespatos; Hex: Hexahidrita; Am: Amorfos

	Seco				Húmedo			
	Arcilla	Limo	Arena		Arcilla	Limo	Arena	
	<2 μ m	2-50 μ m	50-2000 μ m		<2 μ m	2-50 μ m	50-2000 μ m	
C1	7	40	53	Franca	7	35	58	Franca
C2	13	67	20	Franco-limosa	1	88	11	Limosa
C3	4	19	77	Areno-franca	1	22	77	Areno-franca
C4	1	2	97	Arenosa	1	3	96	Arenosa
C5	6	29	65	Franco-arenosa	5	31	64	Franco-arenosa
C6	3	9	88	Arenosa	1	7	92	Arenosa
C7	0	0	100	Arenosa	0	1	99	Arenosa
C8	6	29	65	Franco-arenosa	5	31	64	Franco-arenosa
MEDIA	5	24	71	Franco-arenosa	3	27	70	Franco-arenosa

Tabla 8.62. Resultados del análisis granulométrico

	Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg μ g/kg
C1	19942	2456	53	162451	3421	619	14591	127
C2	13375	3901	54	120623	1020	826	4864	1012
C3	25273	3033	59	128345	458	225	1338	385
C4	24067	2338	54	106582	440	250	688	30
C5	9241	3750	43	84387	816	928	924	1967
C6	6849	2891	23	45744	438	289	1174	76
C7	10397	2292	41	72776	407	147	2418	122
C8	9251	3749	43	84387	816	928	924	1967
MEDIA	14799	3051	46	100662	977	527	3365	711

Tabla 8.63. Contenido de elementos traza

8.3.2. Punto de muestreo control.

La muestra tomada como control en la zona presenta valores de pH básicos, contenido en carbonato cálcico elevado (27%) y un porcentaje de materia orgánica del 1%, mostrando una composición química y mineralógica similar a los suelos control de otras zonas.

Mineralógicamente, la muestra está formada por carbonatos (calcita y dolomita), filosilicatos, cuarzo y feldespatos.

La textura es franco-arcillo-limosa y el contenido en elementos traza es muy bajo. La presencia de los elementos traza en esta muestra se debe a valores geogénicos y no a una influencia de la actividad minera (Tablas 8.64 a 8.68).

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (dS/m)	% CaCO ₃	%M.O
SCC	8,2	7,9	110	0,6	26,7	1,1

Tabla 8.64. Características generales de la muestra control

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
SCC	0,5	1	13	40	0,3	1	7	0,4	0,4	17	15,1

Tabla 8.65. Contenido en elementos mayoritarios en lamuestra control

	Filo14	Filo10	Filo7	Fsp	Cuarzo	Hem	Cal	Dol	Amorfo
SCC	4	10	2	11	35	28	9	1	4

Tabla 8.66. Composición mineralógica de la muestra control

Filo: Filosilicatos; Hem: Hematites; Fsp: Feldespatos; Cal: Calcita; Dol: Dolomita

	Seco				Húmedo			
	Arcilla	Limo	Arena		Arcilla	Limo	Arena	
	<2µm	2-50µm	50-2000µm		<2µm	2-50µm	50-2000µm	
SCC	29	48	23	Franco-arcillo-limosa	28	49	23	Franco-arcillo-limosa

Tabla 8.67. Resultados del análisis granulométrico de la muestra control

	Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
SCC	85	17	0,3	1234	71	11	212	0,1

Tabla 8.68. Contenido de elementos traza en la muestra control

8.3.3. Análisis estadístico.

Los coeficientes de correlación de Pearson para el contenido en elementos traza, las características analíticas generales y la granulometría están recogidos en la Tabla 8.69. Destaca que el contenido total en cinc y cadmio está positivamente correlacionado con la conductividad eléctrica, y por tanto con las sales solubles. Tanto estos metales como el plomo y el hierro, están negativamente correlacionados con el contenido en carbonato cálcico de los sedimentos, de manera que las mayores concentraciones se dan en sedimentos con poco carbonato cálcico en su composición. Entre los elementos traza, el cinc está positivamente correlacionado con el cadmio y el hierro; el plomo lo hace con el cadmio y el hierro; el cadmio presenta una muy buena correlación con el hierro, que a su vez está positivamente correlacionado con el arsénico. Finalmente, el arsénico está correlacionado con el manganeso y éste lo hace con el mercurio.

En la Tabla 8.70 se recogen los resultados del análisis de correlaciones realizado entre el contenido total en elementos traza y la composición mineralógica. En ella se observa que el contenido en arsénico, manganeso, cadmio y hierro está correlacionado con los filosilicatos a 10Å y 7Å. Por el contrario, el contenido en plomo, cadmio, hierro y arsénico está negativamente correlacionado con los feldespatos, así como el cobre y el plomo lo están con el cuarzo. Al analizar las relaciones existentes entre los elementos traza y los sulfatos se observa como el contenido en cinc, plomo y cadmio se correlaciona positivamente con las jarositas, el plomo además lo está con el yeso, el cinc con la hexahidrita y el cobre con la goldichita. Es de destacar las correlaciones positivas que se establecen entre el cinc, el cadmio, el hierro y el arsénico y los minerales de hierro, tanto hematites como goethita.

Los resultados del análisis de correlaciones entre el contenido en elementos traza y los elementos mayoritarios están recogidos en la Tabla 8.71. Destacan las correlaciones positivas entre el cinc, el cadmio y el mercurio con el porcentaje de SO_3 , de ahí su relación con los sulfatos. También hay que señalar las correlaciones positivas que se establecen entre el hierro y el arsénico con los óxidos de hierro.

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh	CE	CaCO ₃	MO	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Hg	Arcilla	Limo
pH KCl	1,00*															
Eh	-0,95*	-0,95*														
CE	-0,64*	-0,60*	0,55**													
CaCO ₃	0,56**	0,55**	-0,50**													
MO	-0,16	-0,15	-0,05	0,30	0,11											
Zn	-0,46	-0,42	0,41	0,72*	-0,59**	0,28										
Pb	-0,28	-0,26	0,23	0,44	-0,83*	-0,40	0,32									
Cd	-0,47	-0,44	0,45	0,68*	-0,80*	-0,15	0,86*	0,70*								
Fe	-0,17	-0,14	0,12	0,49	-0,68*	-0,07	0,84*	0,55**	0,92*							
As	0,34	0,33	-0,43	-0,18	-0,29	-0,03	0,34	0,18	0,40	0,70*						
Cu	0,10	0,11	-0,16	0,03	-0,45	-0,54**	0,01	0,79*	0,43	0,42	0,41					
Mn	0,40	0,40	-0,43	-0,24	-0,21	-0,07	0,33	0,06	0,35	0,67*	0,97*	0,25				
Hg	-0,10	-0,09	0,02	0,18	-0,28	-0,44	-0,19	0,68*	0,23	0,10	-0,01	0,87*	-0,19			
Arcilla	0,59**	0,57**	-0,60*	-0,53**	0,95*	0,19	-0,58**	-0,78*	-0,77*	-0,59**	-0,09	-0,30	-0,07	-0,15		
Limo	0,72*	0,74*	-0,59**	-0,24	0,33	-0,59**	-0,21	0,13	-0,01	0,12	0,21	0,45	0,25	0,31	0,31	
Arena	-0,80*	-0,81*	0,69*	0,36	-0,56**	0,47	0,34	0,11	0,23	0,07	-0,15	-0,31	-0,20	-0,23	-0,55	-0,96*

Tabla 8.69. Matriz de correlación de Pearson entre el contenido total de elementos traza, características analíticas generales y granulometría de los sedimentos.

(**) p<0,05; (*) p<0,01

	Filo 14	Filo 10	Filo 7	Fsp	Cuarz	Yeso	Jaros	Hema	Calc	Dol	Hex	Goeth	Akag	Alu	Gol	ZnSO ₄	Amorf
Filo 10	0,21																
Filo 7	-0,05	0,62*															
Fsp	0,53**	-0,25	-0,55**														
Cuarzo	0,47	0,64*	0,34	0,34													
Yeso	0,26	-0,70*	-0,37	0,07	-0,64*												
Jarosita	-0,60*	-0,32	-0,04	-0,65*	-0,60*	0,34											
Hematites	-0,23	0,28	0,72*	-0,52**	0,01	0,00	0,40										
Caicita	-0,02	0,23	-0,42	0,52**	0,34	-0,61*	-0,53**	-0,63*									
Dolomita	-0,55**	0,07	0,29	-0,25	-0,01	-0,56**	-0,22	-0,14	0,28								
Hexah	-0,79*	0,05	0,25	-0,67*	-0,10	-0,34	0,72*	0,39	-0,18	0,27							
Goeth	0,03	0,29	0,73*	-0,33	0,19	0,05	0,22	0,96*	-0,65*	-0,26	0,20						
Akag	-0,14	-0,77*	-0,52**	0,02	-0,91*	0,84*	0,40	-0,10	-0,32	-0,26	-0,23	-0,18					
Alun	0,39	0,07	0,02	0,25	0,43	0,00	-0,29	0,11	-0,13	-0,17	-0,18	0,22	-0,25				
Goldi	0,29	-0,34	-0,42	-0,11	-0,59**	0,70*	0,21	-0,42	-0,25	-0,34	-0,35	-0,43	0,64*	-0,25			
ZnSO ₄	-0,84*	0,03	0,41	-0,71*	-0,14	-0,41	0,50**	0,33	-0,19	0,65*	0,88*	0,14	-0,23	-0,19	-0,37		
Amorf	-0,76*	0,05	0,33	-0,82*	-0,27	-0,15	0,85*	0,55**	-0,40	0,15	0,95*	0,34	-0,06	-0,22	-0,18	0,83*	
Zn	-0,37	-0,09	0,43	-0,34	-0,11	0,14	0,59**	0,84*	-0,59**	-0,22	0,52**	0,81*	0,06	-0,12	-0,41	0,37	0,60*
Pb	-0,27	-0,33	0,27	-0,72*	-0,67*	0,58**	0,63**	0,38	-0,85*	0,03	0,27	0,28	0,51**	-0,13	0,49	0,38	0,50**
Cd	-0,42	-0,18	0,50**	-0,59**	-0,39	0,33	0,65*	0,87*	-0,82*	-0,07	0,46	0,78*	0,28	0,00	-0,16	0,45	0,64*
Fe	-0,34	0,17	0,72*	-0,64*	-0,21	0,10	0,49	0,95*	-0,70*	-0,04	0,40	0,87*	0,06	-0,13	-0,26	0,41	0,59**
As	0,14	0,63*	0,76*	-0,39	0,09	-0,12	-0,08	0,67*	-0,30	-0,07	-0,12	0,67*	-0,17	-0,18	-0,13	-0,06	0,07
Cu	-0,23	-0,16	0,19	-0,59**	-0,77*	0,45	0,32	0,20	-0,48	0,17	-0,07	0,06	0,61*	-0,34	0,56**	0,14	0,19
Mn	0,13	0,74*	0,86*	-0,36	0,30	-0,32	-0,19	0,69*	-0,23	0,06	-0,06	0,71*	-0,39	-0,05	-0,33	0,03	0,07
Hg	-0,29	-0,40	-0,26	-0,44	-0,90*	0,55**	0,43	-0,09	-0,29	0,05	-0,02	-0,27	0,78*	-0,23	0,71*	0,07	0,18

Tabla 8.70. Matriz de correlación de Pearson entre el contenido total de elementos traza y la composición mineralógica de los sedimentos.
(**) p<0,05; (*) p<0,01

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
MgO	-0,16											
Al ₂ O ₃	-0,11	0,18										
SiO ₂	0,36	-0,27	0,51**									
P ₂ O ₅	0,42	-0,50*	0,05	0,14								
SO ₃	-0,10	0,30	-0,26	-0,75*	0,30							
K ₂ O	-0,22	0,00	0,12	-0,31	0,13	0,40						
CaO	-0,34	-0,26	0,10	-0,22	-0,22	-0,34	0,10					
TiO ₂	-0,71*	0,00	0,58**	-0,05	0,13	0,22	0,44	0,13				
MnO	-0,29	0,40	0,09	0,11	-0,94*	-0,52**	-0,25	0,25	-0,20			
Fe ₂ O ₃	-0,46	0,31	0,07	-0,15	-0,84*	-0,20	-0,06	0,23	0,02	0,87*		
1000°C	-0,28	0,01	-0,44	-0,87*	0,04	0,63*	0,26	0,33	0,02	-0,15	0,20	
Zn	0,21	0,40	-0,70*	-0,40	-0,25	0,45	-0,18	-0,60*	-0,56**	0,12	0,17	0,24
Pb	-0,39	0,82*	0,18	-0,51**	-0,24	0,69*	0,33	-0,31	0,41	0,02	0,16	0,22
Cd	0,08	0,72*	-0,31	-0,49	-0,33	0,62*	0,04	-0,56**	-0,27	0,18	0,30	0,29
Fe	-0,05	0,63*	-0,32	-0,36	-0,59**	0,37	-0,04	-0,48	-0,28	0,46	0,57**	0,18
As	-0,20	0,24	0,03	0,11	-0,73*	-0,18	-0,02	-0,22	-0,02	0,70*	0,76*	-0,23
Cu	-0,50	0,57**	0,30	-0,50**	-0,47	0,43	0,48	0,15	0,50**	0,26	0,44	0,24
Mn	-0,11	0,26	0,07	0,26	-0,75*	-0,34	-0,17	-0,22	-0,15	0,79*	0,79*	-0,31
Hg	-0,45	0,31	0,29	-0,62*	-0,04	0,62*	0,61*	0,27	0,62*	-0,15	0,14	0,50**

Tabla 8.71. Matriz de correlación de Pearson entre el contenido total de elementos traza y los elementos mayoritarios.

(**) p<0,05; (*) p<0,01

Al igual que en las zonas A y B, se ha realizado un análisis de componentes principales, para agrupar las variables en factores (Tabla 8.72):

- F1: incluye el Al_2O_3 , los feldespatos, la calcita y el contenido en carbonato cálcico en la parte negativa. En la parte positiva se engloban la conductividad eléctrica, el MgO , las jarositas, hematites, hexahidrita, goethita, amorfos y el contenido total de cinc, plomo, cadmio, hierro y arsénico.
- F2: en la parte positiva se incluye el pH junto con el CaO , MnO , Fe_2O_3 , dolomita y sulfatos hidratados en la parte positiva, mientras que en la negativa aparecen el potencial redox, la materia orgánica, la alunita y los filosilicatos a 14Å.
- F3: incluye en la parte positiva la sílice, el cuarzo, los filosilicatos a 10Å y 7Å y el manganeso. En la parte negativa, por el contrario, el contenido en SO_3 , yeso, goldichita, akaganeita, cobre y mercurio.

Las representaciones gráficas de las puntuaciones factoriales de cada muestra se recoge en la Figura 8.5. Todos los sedimentos son muy similares, por lo que no se pueden establecer grupos al no existir diferencias significativas.

	F1	F2	F3
pH H ₂ O	-0,394	0,813	0,299
pH KCl	-0,358	0,837	0,284
Eh	0,340	-0,764	-0,197
CE	0,719	-0,204	-0,281
CaCO ₃	-0,815	0,327	0,233
MO	-0,005	-0,360	0,196
Na ₂ O	-0,066	-0,673	0,358
MgO	0,689	0,256	-0,145
Al ₂ O ₃	-0,344	0,075	-0,103
SiO ₂	-0,455	-0,315	0,645
P ₂ O ₅	-0,350	-0,773	-0,281
SO ₃	0,595	-0,257	-0,697
K ₂ O	-0,019	0,017	-0,612
CaO	-0,616	0,685	-0,224
TiO ₂	-0,191	0,160	-0,590
MnO	0,200	0,762	0,514
Fe ₂ O ₃	0,340	0,799	0,301
Filo 14	-0,392	-0,567	0,229
Filo 10	-0,037	0,409	0,695
Filo 7	0,568	0,378	0,589
Feldespatos	-0,690	-0,565	0,183
Cuarzo	-0,286	-0,171	0,892
Yeso	0,244	-0,556	-0,698
Jarosita	0,711	0,026	-0,488
Hematites	0,886	0,011	0,359
Calcita	-0,827	0,270	0,224
Dolomita	-0,129	0,742	0,095
Hexahidrita	0,566	0,337	0,030
Goethita	0,803	-0,181	0,485
Akaganeita	0,134	-0,193	-0,863
Alunita	-0,059	-0,542	0,297
Goldichita	-0,147	-0,091	-0,808
Sulfatos hidratados	0,503	0,565	0,025
Amorfo	0,741	0,339	-0,099
Zn	0,875	-0,163	0,208
Pb	0,688	0,115	-0,577
Cd	0,968	-0,032	-0,067
Fe	0,928	0,169	0,167
As	0,431	0,338	0,387
Cu	0,358	0,438	-0,610
Mn	0,395	0,355	0,586
Hg	0,142	0,277	-0,873
Varianza (%)	28	25	18

Tabla 8.72. Factores obtenidos tras el análisis de componentes principales entre composición química, composición mineralógica, características analíticas generales y concentración de elementos traza

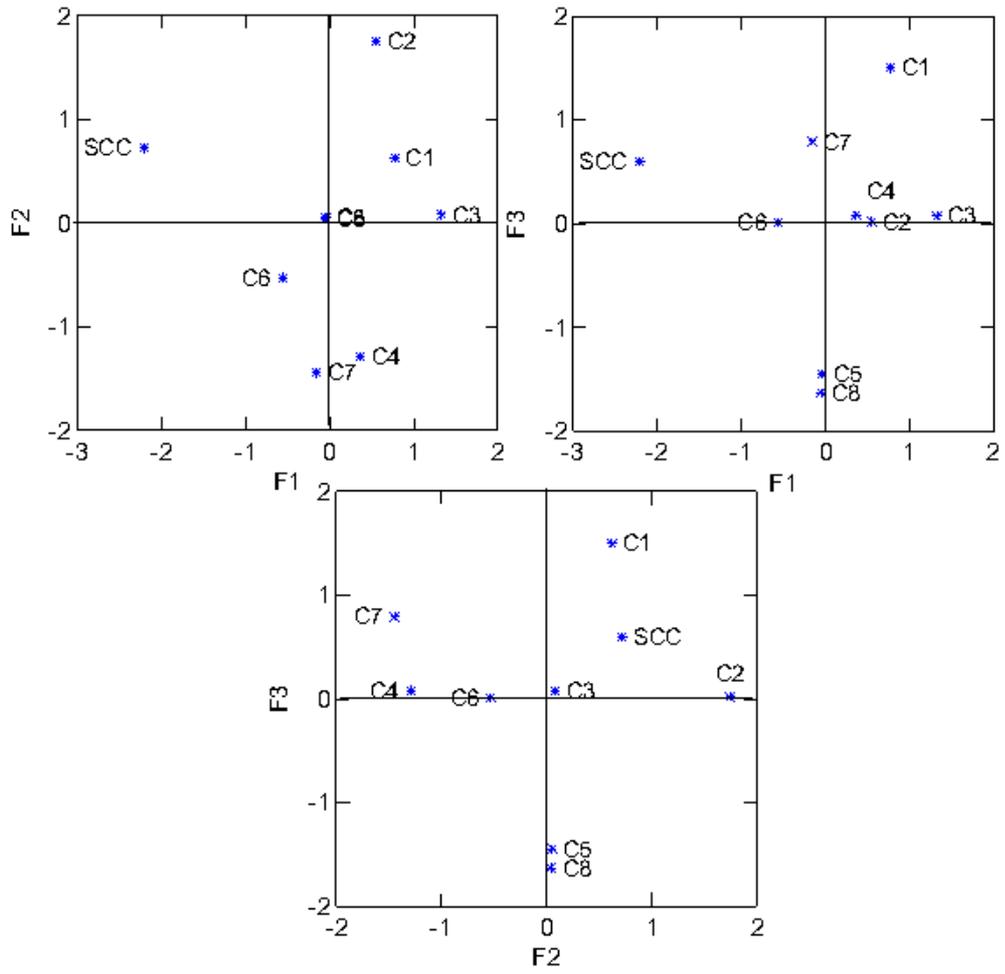


Figura 8.5. Representación gráfica de los factores obtenidos

8.3.4. Modelo conceptual de dispersión hídrica de la contaminación.

En el Cabezo Rajao y zonas adyacentes todos los puntos de muestreo sufren contaminación primaria, ya que por su cercanía a las balsas de estériles de flotación y escombreras, no se ha producido una atenuación natural de la contaminación por mezcla con materiales circundantes, como ocurría en otras zonas.

El Cabezo Rajao es un foco de contaminación, en el que hay gran cantidad de balsas de estériles, sobre todo en la ladera este. De ellas, y a través de las Ramblas, principalmente la del Miedo, los elementos traza son transportados.

El sedimento C1 no recibe los aportes de elementos traza del Cabezo Rajao sino que está afectado por las aguas de escorrentía y los materiales procedentes de la mina Brunita, situada al sureste del Cabezo Rajao (Figura 8.6).

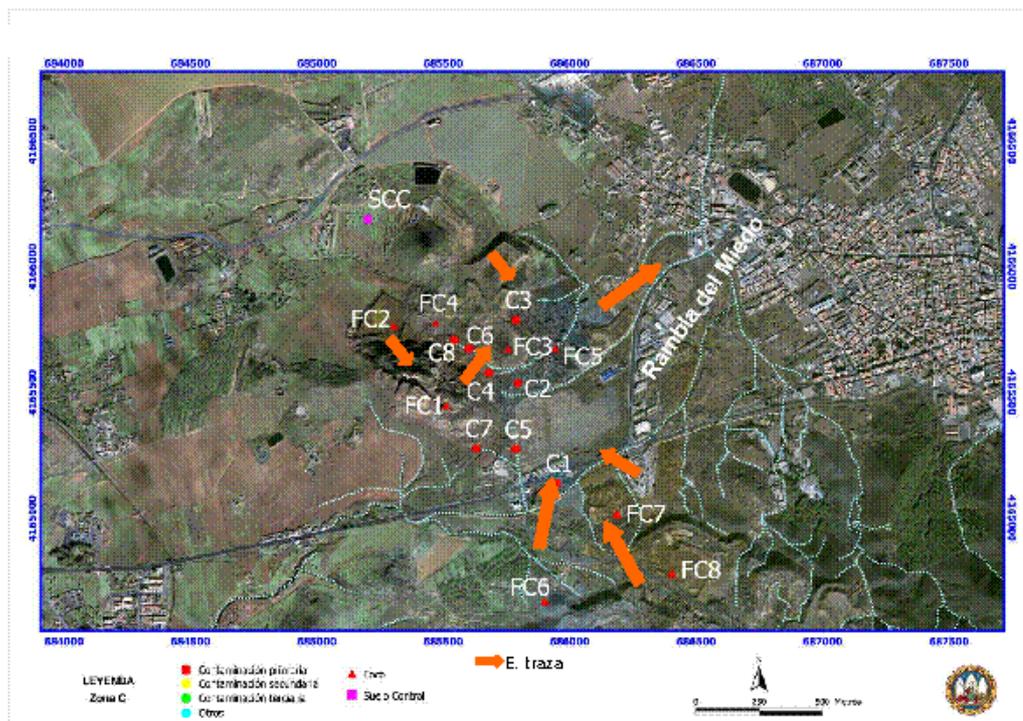


Figura 8.6. Cuadro resumen de los flujos en la zona del Cabezo Rajao

8.4. Zona D (Gorguel).

8.4.1. Contaminación primaria.

En la zona del Gorguel las muestras están recogidas en dos zonas afectadas por distintas balsas de estériles de flotación. Los puntos de la parte baja (D2-D7) se diferencian de los de la parte alta (D8-D13) en que la explotación minera es más antigua, por lo que los materiales aparecen más alterados.

Aún así, tienen en común que están sufriendo procesos de alteración supergénica y presentan características similares: todas tienen pH ácido y el contenido en carbonato cálcico y materia orgánica es nulo. Además, los valores de conductividad eléctrica son altos, debido a la presencia de sales solubles (Tabla 8.73).

Los puntos de muestreo D2 a D7 están localizados en la parte baja de la Rambla del Gorguel y corresponden a sedimentos afectados por las balsas más antiguas, destacando en su mineralogía la presencia de jarositas, yeso, alunita y goldichita, junto con óxidos de hierro y amorfos, además de los minerales propios de la roca encajante, cuarzo, filosilicatos y feldespatos (Tabla 8.77).

Los puntos de muestreo D8 a D13, recogidos en una zona topográficamente más alta y afectada por balsas más modernas que en el caso anterior, se diferencian de los anteriores en que la concentración de alunita es menor.

Comparando ambos grupos se aprecia que los sedimentos de la parte baja tienen mayor contenido en jarositas (mayor alteración) que los de la parte alta, en los que es mayor el contenido en yeso (menor alteración).

Los resultados del análisis químico total también difieren entre los dos grupos de muestras: el contenido en Al_2O_3 , SiO_2 y SO_3 es menor en las situadas en la parte alta de la zona (Tabla 8.74).

La textura oscila desde arenosa a franco-arenosa en seco y desde franca a arenosa en húmedo, es decir, las texturas más finas se corresponden con puntos en los que tiene lugar una recepción de materiales, mientras que las texturas

gruesas son puntos en los que debido a la pendiente predominan los fenómenos de transporte (Tabla 8.76).

La concentración de elementos traza es muy elevada, con valores medios de 7889 mg kg⁻¹ de cinc, 9484 mg kg⁻¹ de plomo, 22% de hierro, 2354 mg kg⁻¹ de arsénico y 32 mg kg⁻¹ de cadmio.

Las muestras localizadas en la parte alta (D8-D13) tienen una concentración más alta de cinc y manganeso que las recogidas en la parte baja, mientras que la concentración de arsénico y plomo es más elevada en la parte baja (Tabla 8.77).

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (1:5) (dS/m)	% CaCO ₃	%M.O
D2	2,5	2,4	504	2,5	<ld	<ld
D3	2,1	1,8	570	6,2	<ld	<ld
D4	2,1	2,2	545	6,2	<ld	<ld
D5	2,2	1,8	566	6,9	<ld	<ld
D6	2,1	2,1	559	1,6	<ld	<ld
D7	5,8	5,0	269	1,3	<ld	<ld
D8	4,1	3,9	318	1,8	<ld	<ld
D9	4,5	4,2	280	6,0	<ld	<ld
D10	4,5	4,1	334	4,7	<ld	<ld
D11	3,6	3,4	382	3,5	<ld	<ld
D12	2,3	2,0	444	15,8	<ld	<ld
D13	3,0	2,7	422	5,3	<ld	<ld
MEDIA	3,2	3,2	433	5,1	-	-

Tabla 8.73. Características generales de las muestras

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
D2	0,3	0,5	6	13	0,1	15	1	1	0,2	0,1	26	19,5
D3	0,3	0,5	6	13	0,1	15	1	1	0,2	0,1	26	32,5
D4	0,3	1	7	22	0,1	14	1	2	0,3	0,1	23	24,1
D5	0,3	1	7	22	0,1	14	1	2	0,3	0,1	23	28,2
D6	0,3	0,3	5	33	0,1	10	1	0	0,3	0,1	31	17,1
D7	0,2	2	11	38	0,1	5	1	1	0,4	0,3	30	10,4
D8	0,2	2	11	38	0,1	5	1	1	0,4	0,3	30	9,1
D9	0,3	3	11	28	0,1	7	1	2	0,3	0,2	28	15,2
D10	0,3	3	11	28	0,1	7	1	2	0,3	0,2	28	16,5
D11	0,2	2	10	26	0,1	7	1	3	0,4	0,2	32	16,4
D12	0,2	2	10	26	0,1	7	1	3	0,4	0,2	32	30,6
D13	0,5	2	8	28	0,1	11	1	3	0,3	0,2	29	15,5
MEDIA	0,3	2	9	26	0,1	10	1	2	0,3	0,2	28	20

Tabla 8.74. Contenido en elementos mayoritarios

	Filo14	Filo10	Filo7	Fsp	Cuarzo	Yeso	Jar	Hem	Gt	Aka	Alu	Gol	Amorfo
D2		8	4	5	21	7	22	4	6	4	4	11	6
D3		5	6	4	3	9	39	4	2	9	3	11	6
D4		7	2	6	22	8	29	5	5	5	4		7
D5		6	3	5	17	10	33	5	5	4	3		9
D6		10	5	9	18		35	6	7		5		5
D7		13	3	13	38	7	6	8	9				3
D8	5	10	4	10	28	6	6	6	13	12			2
D9	7	6	6	6	22	14	15	5	6	7	2		6
D10	7	6	8	6	18	9	19	4	6	4		6	8
D11	9	5	9	6	21	14	12	4	5	6		4	5
D12		5	3	6	21	15	31	6	4	4	3		3
D13	7	6	6	7	20	10	17	5	6	7		5	5
MEDIA	2,9	7,3	4,9	6,9	20,8	9,1	22,0	5,2	6,2	5,2	2,0	3,1	5,4

Tabla 8.75. Composición mineralógica

Filo: Filosilicatos; Jar: Jarosita; Hem: Hematites; Gt: Goethita; Aka: Akaganeita; Alu: Alunita; Gol: Goldichita; Fsp: Feldespatos

	Seco				Húmedo			
	Arcilla	Limo	Arena		Arcilla	Limo	Arena	
	<2µm	2-50µm	50-2000µm		<2µm	2-50µm	50-2000µm	
D2	8	3	89	Areno-franca	12	27	61	Franca
D3	2	10	88	Areno-franca	11	26	63	Franca
D4	2	7	91	Arenosa	1	6	93	Arenosa
D5	1	4	95	Arenosa	1	4	95	Arenosa
D6	4	15	81	Areno-franca	4	12	84	Franco-arenosa
D7	0	2	98	Arenosa	0	1	99	Arenosa
D8	1	5	94	Arenosa	0	1	99	Arenosa
D9	3	20	77	Franco-arenosa	2	42	56	Franca
D10	3	15	82	Areno-franca	2	34	64	Franca
D11	4	19	77	Franco-arenosa	1	11	88	Areno-franca
D12	3	2	95	Arenosa	1	9	90	Arenosa
D13	2	11	87	Areno-franca	2	7	91	Arenosa
MEDIA	3	9	88	Areno-franca	3	15	82	Areno-franca

Tabla 8.76. Resultados del análisis granulométrico

	Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
D2	2232	47619	37	214782	3939	636	496	<ld
D3	2430	12148	39	242954	3210	569	685	<ld
D4	2163	3558	22	199519	3961	615	721	<ld
D5	1722	3086	23	218504	2362	344	802	<ld
D6	12364	21884	22	233432	4429	310	495	528
D7	19366	3486	21	221831	1610	233	2264	<ld
D8	9158	3571	22	184066	1448	165	1877	<ld
D9	10169	3428	55	213790	1493	207	3125	<ld
D10	4975	3438	75	227363	1260	149	2025	<ld
D11	11263	2693	22	244858	1481	1335	1665	<ld
D12	11964	2039	25	277168	1866	1082	1645	<ld
D13	6856	6856	25	243879	1190	137	1714	<ld
MEDIA	7889	9484	32	226846	2354	482	1460	44

Tabla 8.77. Contenido de elementos traza

8.4.2. Contaminación secundaria.

El punto de muestreo D1 está situado en una zona de compensación, que como ya se ha comentado anteriormente, recibe aportes de las balsas de la zona, pero en la que al mismo tiempo tiene lugar un transporte de materiales.

Por ello, y a pesar de estar muy cerca de las anteriores (D2-D7) consideramos que está afectada por contaminación secundaria. Además, los materiales procedentes de las balsas suprayacentes se han mezclado con las filitas del material original, por lo que aunque de manera leve, la contaminación se está atenuando al quedar los elementos traza retenidos, fijados a las arcillas.

Los puntos D14 y D15 son suelos en los que los aportes de las balsas son menores, ya que no se han tomado en el cauce de la Rambla del Gorguel sino en puntos topográficamente más altos. Están menos afectados por las aguas de escorrentía y de ahí la menor concentración en elementos traza.

En su composición mineralógica se han cuantificado los minerales típicos de la roca encajante, no existiendo prácticamente sulfatos procedentes de la alteración (Tabla 8.80)

D1, D14 y D15 presentan textura arenosa o areno-franca, siendo escaso el porcentaje de fracción fina depositado por sedimentación (Tabla 8.81).

El contenido en elementos traza en estos puntos es inferior al que presentaban las muestras afectadas por contaminación primaria, ya sea porque su situación topográfica favorece el arrastre o porque la mezcla con las filitas circundantes atenúa la contaminación (Tabla 8.82).

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (1:5) (dS/m)	% CaCO ₃	% M.O
D1	2,5	2,4	157	4,5	<ld	<ld
D14	4,2	4,1	257	2,5	<ld	1,0
D15	8,1	7,9	215	0,5	13,3	1,2
MEDIA	4,9	4,8	209,7	2,5	4,4	0,8

Tabla 8.78. Características generales de las muestras

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
D1	0,5	1	7	34	0,1	11	1	5	0,3	0,2	20	17,3
D14	0,3	0,4	5	15	0,1	20	1	11	0,2	1	27	18,1
D15	1	1	19	52	0,1	1	3	5	1	0,2	9	7,5
MEDIA	0,6	0,8	10,3	33,7	0,1	10,7	1,7	7,0	0,6	0,8	10,3	33,7

Tabla 8.79. Contenido en elementos mayoritarios

	Filo10	Filo7	Fsp	Cuarzo	Yeso	Jar	Hem	Gt	Aka	Alu	Gol	Amorfo
D1	8	9	9	23	7	7	7	4	8	6	7	3
D14	2	1	5	34	32	11	2		13			0
D15	25	5	13	39			9			7		2
MEDIA	11,7	5,0	9,0	32,0	13,0	6,0	6,0	1,3	7,0	4,3	2,3	1,7

Tabla 8.80. Composición mineralógica

Filo: Filosilicatos; Jar: Jarosita; Hem: Hematites; Gt: Goethita; Aka: Akaganeita; Alu: Alunita; Gol: Goldichita; Fsp: Feldespatos

	Seco				Húmedo			
	Arcilla	Limo	Arena		Arcilla	Limo	Arena	
	<2µm	2-50µm	50-2000µm		<2µm	2-50µm	50-2000µm	
D1	6	31	63	Franco-arenosa	2	26	74	Franco-arenosa
D14	3	12	85	Areno-franca	2	12	86	Areno-franca
D15	1	6	93	Arenosa	1	12	87	Areno-franca
MEDIA	3	16	80	Areno-franca	3	16	80	Areno-franca

Tabla 8.81. Resultados del análisis granulométrico

	Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
D1	10437	2471	23	157767	1593	404	1553	114
D14	2388	554	10	42980	3115	110	6686	651
D15	1210	1936	11	73088	304	131	1447	658
MEDIA	5223	2954	17	129428	1550	195	2850	356

Tabla 8.82. Contenido de elementos traza

8.4.3. Punto de muestreo control.

El punto de control de la zona de El Gorguel presenta valores de pH básicos, contenido en carbonato cálcico elevado (28%) y un porcentaje de materia orgánica del 1,5% (Tabla 8.83).

Mineralógicamente, la muestra está formada por carbonatos (calcita y dolomita), filosilicatos, cuarzo y feldespatos, al igual que el resto de puntos de control de las otras zonas (Tabla 8.85). La textura, tanto en húmedo como en seco, es franco limosa y la concentración de elementos traza es baja (Tablas 8.86 y 8.87). Como no está influida por la actividad minera, podemos decir que los elementos traza tienen un origen natural, geogénico.

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (1:5) (dS/m)	% CaCO ₃	% M.O
SCD	8,3	7,3	145	0,7	28	1,5

Tabla 8.83. Características generales de las muestras

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
SCD	1	1	17	49	0,1	1	3	6	1	0,2	11	9,5

Tabla 8.84. Contenido en elementos mayoritarios

	Filo14	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Cal	Dol	Am
SCD	4	7	2	15	33	29	8	1

Tabla 8.85. Composición mineralógica

	Seco				Húmedo			
	Arcilla	Limo	Arena		Arcilla	Limo	Arena	
	<2µm	2-50µm	50-2000µm		<2µm	2-50µm	50-2000µm	
SCD	18	43	39	Franco-limosa	17	43	40	Franco-limosa

Tabla 8.86. Resultados del análisis granulométrico

	Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
SCD	67	10	0,3	700	12	14	200	0,05

Tabla 8.87. Contenido de elementos traza

8.4.4. Análisis estadístico.

Los coeficientes de correlación de Pearson para el contenido en elementos traza, las características analíticas generales y la granulometría están recogidos en la Tabla 8.88. Existen correlaciones estadísticamente significativas entre la conductividad eléctrica y el contenido total de hierro y cobre, por lo que pueden ir asociados a fases solubles.

Por otro lado, el hierro y el arsénico presentan menor concentración en sedimentos con elevado contenido en carbonato cálcico.

Al estudiar las correlaciones entre los distintos elementos, destacan las existentes entre el cinc y el cadmio con el hierro, el plomo con el arsénico y el hierro con el cobre. Además el hierro y el mercurio están negativamente correlacionados.

En la Tabla 8.89 se recogen los resultados del análisis de correlaciones realizado entre el contenido total en elementos traza y la composición mineralógica.

El contenido en cadmio, hierro y arsénico está negativamente correlacionado con los feldespatos y el cuarzo (roca encajante). En cuanto a las fases solubles, el manganeso está positivamente correlacionado con el yeso, el hierro y el arsénico con las jarositas y el plomo con la goldichita.

Finalmente, el cinc está positivamente correlacionado con el hematites y la goethita, así como el hierro lo hace con la goethita y los amorfos.

Los resultados del análisis de correlaciones entre el contenido en elementos traza y los elementos mayoritarios están recogidos en la Tabla 8.90. De todos los elementos estudiados, únicamente el arsénico, el cadmio y el hierro presentan correlaciones estadísticamente significativas: el hierro lo hace negativamente con el Na_2O y K_2O , el cadmio positivamente con el MgO y el arsénico positivamente con SO_3 y negativamente con SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , Na_2O y K_2O .

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh	CE	CaCO ₃	MO	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Hg	Arcilla	Limo
pH KCl	0,99*															
Eh	-0,75*	-0,75*														
CE	-0,54**	-0,56**	0,39													
CaCO ₃	0,80*	0,77*	-0,52**	-0,38												
MO	0,76*	0,77*	-0,61*	-0,20	0,72*											
Zn	-0,14	-0,16	-0,11	0,11	-0,41	-0,20										
Pb	-0,36	-0,34	0,47	-0,16	-0,21	-0,40	-0,11									
Cd	-0,29	-0,29	0,22	0,26	-0,48	-0,27	0,09	0,19								
Fe	-0,71*	-0,73*	0,67*	0,54**	-0,75*	-0,70*	0,50**	0,27	0,56**							
As	-0,73*	-0,70*	0,74*	0,11	-0,56**	-0,49	-0,04	0,60*	0,10	0,35						
Cu	-0,49	-0,48	0,42	0,53**	-0,36	-0,29	0,24	0,15	0,03	0,54**	0,26					
Mn	0,11	0,14	-0,38	-0,04	-0,26	0,24	0,10	-0,34	0,00	-0,29	-0,03	-0,22				
Hg	0,26	0,33	-0,19	-0,38	0,13	0,45	-0,16	-0,02	-0,38	-0,50**	0,14	-0,31	0,42			
Arcilla	0,20	0,16	0,01	-0,22	0,59**	0,16	-0,48	0,45	-0,11	-0,35	0,05	-0,10	-0,40	-0,16		
Limo	0,27	0,25	-0,33	-0,08	0,40	0,34	-0,30	0,13	0,41	-0,28	-0,21	-0,20	-0,08	-0,16	0,63*	
Arena	-0,28	-0,25	0,25	0,13	-0,49	-0,32	0,38	-0,24	-0,30	0,32	0,15	0,19	0,18	0,17	-0,79*	-0,97*

Tabla 8.88. Matriz de correlación de Pearson entre el contenido total de elementos traza, características analíticas generales y granulometría de los sedimentos.

(**) p<0,05; (*) p<0,01

	Filo14	Filo 10	Filo 7	Fsp	Qtz	Gp	Jar	Hem	Gt	Aka	Alu	Goldi	Amor	Cal	Dol
Filo 10	-0,25														
Filo 7	0,51**	0,02													
Fsp	-0,04	0,65*	-0,16												
Qtz	-0,09	0,53**	-0,40	0,72*											
Gp	0,07	-0,61*	-0,17	-0,60*	-0,01										
Jar	-0,30	-0,42	-0,05	-0,70*	-0,82*	0,08									
Hem	-0,28	0,68*	0,24	0,21	0,18	-0,32	-0,05								
Gt	0,26	-0,01	0,14	-0,01	-0,09	-0,19	0,06	0,36							
Aka	0,18	-0,52**	0,08	-0,54**	-0,24	0,67*	0,03	-0,23	0,12						
Alu	-0,62*	0,50**	0,11	0,02	-0,10	-0,40	0,23	0,52**	-0,26	-0,29					
Goldi	0,03	-0,22	0,52**	-0,43	-0,59**	-0,05	0,25	-0,14	-0,06	0,22	0,12				
Amor	0,15	-0,24	0,30	-0,58**	-0,70*	-0,14	0,66*	0,04	0,25	-0,13	0,12	0,33			
Cal	0,12	-0,05	-0,30	0,57**	0,28	-0,32	-0,37	-0,62*	-0,38	-0,34	-0,26	-0,18	-0,36		
Dol	0,12	-0,05	-0,30	0,57**	0,28	-0,32	-0,37	-0,62*	-0,38	-0,34	-0,26	-0,18	-0,36	1,00*	
Zn	0,13	0,03	0,27	0,17	0,11	0,00	-0,08	0,50**	0,59**	-0,11	-0,16	-0,20	-0,12	-0,33	-0,33
Pb	-0,25	0,00	0,00	-0,26	-0,30	-0,22	0,35	-0,04	0,18	-0,14	0,29	0,57**	0,27	-0,17	-0,17
Cd	0,37	-0,25	0,50**	-0,51**	-0,53**	0,08	0,33	0,03	0,31	0,12	-0,10	0,43	0,65*	-0,40	-0,40
Fe	0,15	-0,25	0,39	-0,54**	-0,65*	-0,01	0,65*	0,35	0,58**	0,02	0,00	0,30	0,66*	-0,63*	-0,63*
As	-0,49	-0,32	-0,23	-0,57**	-0,46	0,18	0,72*	-0,05	0,13	0,15	0,29	0,22	0,35	-0,42	-0,42
Cu	0,03	-0,28	0,26	-0,45	-0,39	0,19	0,38	0,04	0,02	0,03	0,10	0,24	0,22	-0,28	-0,28
Mn	0,08	-0,25	-0,18	-0,21	0,37	0,84*	-0,29	-0,13	-0,14	0,57**	-0,38	-0,26	-0,42	-0,26	-0,26
Hg	-0,38	0,43	-0,18	0,19	0,41	0,13	-0,17	0,18	-0,43	-0,05	0,38	-0,30	-0,46	-0,13	-0,13

Tabla 8.89. Matriz de correlación de Pearson entre el contenido total de elementos traza y la composición mineralógica de los sedimentos.
(**) p<0,05; (*) p<0,01

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000C
MgO	-0,23										
Al ₂ O ₃	0,70*	0,35									
SiO ₂	0,68*	0,19	0,83*								
SO ₃	-0,48	-0,48	-0,89*	-0,88*							
K ₂ O	0,94*	-0,19	0,83*	0,73*	-0,61*						
CaO	0,41	-0,24	0,15	0,08	0,16	0,36					
TiO ₂	0,86*	-0,02	0,91*	0,85*	-0,78*	0,96*	0,27				
MnO	-0,08	-0,11	-0,12	-0,14	0,32	-0,06	0,79*	-0,11			
Fe ₂ O ₃	-0,91*	0,35	-0,61*	-0,55**	0,32	-0,87*	-0,40	-0,77*	0,09		
1000C	-0,46	-0,24	-0,61*	-0,75*	0,62*	-0,49	-0,18	-0,55**	-0,19	0,31	
Zn	-0,49	0,43	-0,10	0,16	-0,28	-0,44	-0,36	-0,24	-0,04	0,61*	-0,17
Pb	-0,18	-0,40	-0,41	-0,41	0,34	-0,21	-0,41	-0,33	-0,29	0,17	0,14
Cd	-0,43	0,57**	-0,19	-0,37	0,09	-0,47	-0,46	-0,49	-0,27	0,40	0,22
Fe	-0,73*	0,36	-0,47	-0,46	0,17	-0,74*	-0,77*	-0,64*	-0,51**	0,76*	0,50**
As	-0,56**	-0,55**	-0,83*	-0,71*	0,76*	-0,58**	-0,27	-0,68*	-0,01	0,41	0,55**
Cu	-0,45	0,02	-0,25	-0,40	0,13	-0,35	-0,23	-0,26	-0,27	0,41	0,52**
Mn	-0,23	0,15	-0,15	-0,22	0,31	-0,23	0,66*	-0,26	0,93*	0,24	-0,15
Hg	0,33	-0,49	0,05	0,20	0,10	0,33	0,52**	0,23	0,51**	-0,29	-0,26

Tabla 8.90. Matriz de correlación de Pearson entre el contenido total de elementos traza y los elementos mayoritarios.
(**) p<0,05; (*) p<0,01

Como en las otras zonas, se ha realizado un análisis de componentes principales, que agrupa a las variables en 4 factores, explicando más del 70% de la varianza (Tabla 8.91):

- F1: en la parte positiva se agrupa el pH, la materia orgánica, sílice, Al_2O_3 , K_2O , TiO_2 , filosilicatos a 10Å, feldespatos y cuarzo. En la parte negativa, la conductividad eléctrica, SO_3 , jarosita, goldichita, amorfos, plomo, arsénico y cobre.
- F2: en este factor se incluyen CaO , MnO , yeso, akaganeita y manganeso, todos en la parte negativa.
- F3: en la parte negativa del factor aparece la alunita y el mercurio, y en la positiva MgO , filosilicatos a 14Å y 7Å y el cadmio.
- F4: en este factor se agrupan los óxidos de hierro y el contenido total de cinc y hierro en la parte positiva, mientras que las fases carbonatadas lo hacen en la negativa.

Al representar gráficamente las puntuaciones factoriales F1-F2 (Figura 8.7), se observa como en el primer cuadrante aparecen el suelo control y el sedimento D15, que son los puntos que menor concentración en elementos traza presentan, además de pH básico y en su composición mineralógica cuarzo y feldespatos.

Al representar F1-F3, en el cuarto cuadrante también aparecen los puntos con menor influencia de la zona minera. Además, existe una separación entre los puntos de la parte alta (D8-D13) y baja de la Rambla (D2-D7), ya que los situados en la parte baja tienen mayor concentración de arsénico y plomo que los situados en la parte alta. Ocurre lo mismo al representar los factores F2 y F3, en la que aparecen dos grupos de muestras en función su localización.

Finalmente, la representación entre F3 y F4 vuelve a agrupar los puntos de muestreo en función de la localización en el primer y segundo cuadrantes. Así, los situados en la parte alta de la rambla tienen mayores concentraciones de cinc y ninguno tiene carbonatos en su composición mineralógica.

	F1	F2	F3	F4
pHH ₂ O	0,883	0,042	0,068	-0,355
pH KCl	0,896	0,026	0,012	-0,325
Eh	-0,822	0,269	-0,158	0,159
CE	-0,518	-0,030	0,217	0,081
CaCO ₃	0,593	0,249	-0,039	-0,756
MO	0,660	-0,154	-0,017	-0,487
Na ₂ O	0,597	0,287	-0,240	-0,614
MgO	0,233	-0,009	0,843	0,333
Al ₂ O ₃	0,812	0,314	0,205	-0,278
SiO ₂	0,890	0,371	0,031	-0,072
SO ₃	-0,757	-0,475	-0,363	0,020
K ₂ O	0,677	0,301	-0,207	-0,603
CaO	0,343	-0,709	-0,248	-0,453
TiO ₂	0,770	0,345	-0,076	-0,468
MnO	0,246	-0,939	-0,182	-0,036
Fe ₂ O ₃	-0,480	-0,284	0,374	0,611
Filo 14	0,153	-0,068	0,852	-0,010
Filo 10	0,664	0,493	-0,419	0,227
Filo 7	-0,067	0,258	0,406	0,298
Feldespatos	0,863	0,312	-0,085	-0,143
Cuarzo	0,868	-0,236	-0,212	0,002
Yeso	-0,272	-0,912	0,071	0,064
Jarosita	-0,876	0,186	-0,136	0,090
Hematites	0,269	0,361	-0,280	0,778
Goethita	-0,063	0,171	0,368	0,697
Akaganeita	-0,307	-0,691	0,132	0,121
Alunita	-0,082	0,472	-0,697	0,113
Goldichita	-0,527	0,180	0,075	-0,065
Amorfo	-0,654	0,413	0,245	0,155
Calcita	0,350	0,140	0,168	-0,831
Dolomita	0,350	0,140	0,168	-0,831
Zn	0,171	0,012	0,277	0,729
Pb	-0,448	0,306	-0,297	0,071
Cd	-0,379	0,108	0,502	0,292
Fe	-0,602	0,297	0,338	0,614
As	-0,722	-0,077	-0,485	0,205
Cu	-0,467	0,108	0,130	0,156
Mn	0,192	-0,935	-0,024	0,176
Hg	0,357	-0,295	-0,718	0,036
Varianza (%)	31	16	15	10

Tabla 8.91. Factores obtenidos tras el análisis de componentes principales entre composición química, composición mineralógica, características analíticas generales y concentración de elementos traza

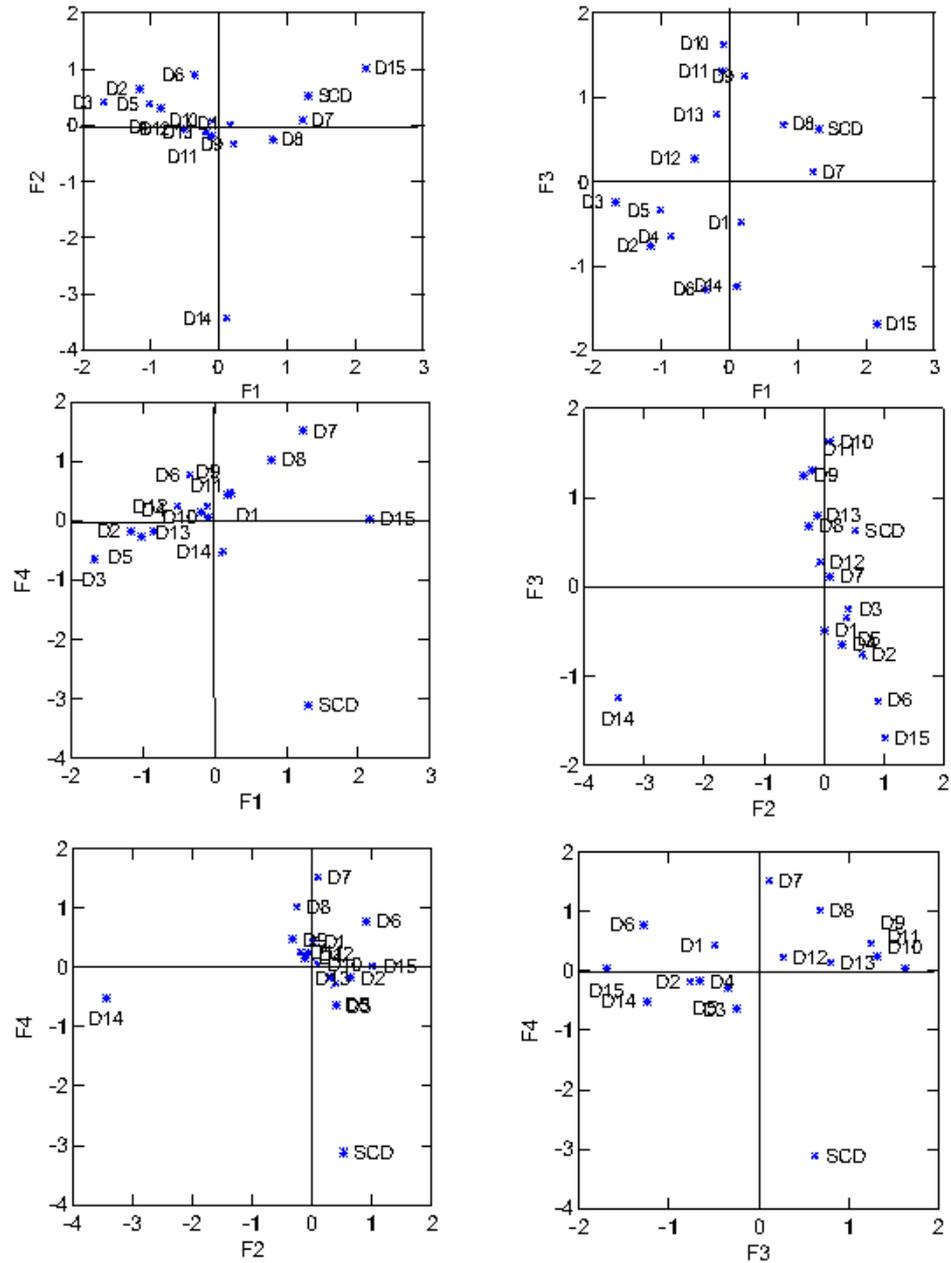


Figura 8.7. Representación gráfica de los factores obtenidos

8.4.5. Modelo conceptual de dispersión hídrica de la contaminación.

En el Gorguel casi todos los sedimentos están afectados por contaminación primaria, dada la cercanía existente entre las balsas de estériles de flotación y los puntos de muestreo.

En ellos, existe un flujo de elementos traza y sales solubles procedentes del drenaje ácido de minas que discurre por ramblas y ramblizos y que en parte se ve atenuado en los puntos D1, D14 y D15 por la mezcla con filitas en las muestras D1 y D14 y con filitas y carbonatos en el punto D15 (Figura 8.8).

En aquellas zonas que se encuentran en las inmediaciones de la Rambla, y cuyo material original está constituido por filitas y con mayor o menor concentración de carbonato cálcico, como son los sedimentos de los puntos D1, D14 y D15, la influencia de las balsas se ve atenuada en primer lugar, porque llega menor flujo de metales al estar localizados fuera del cauce de la rambla, y en segundo lugar, porque hay una atenuación por la mezcla con el material original.

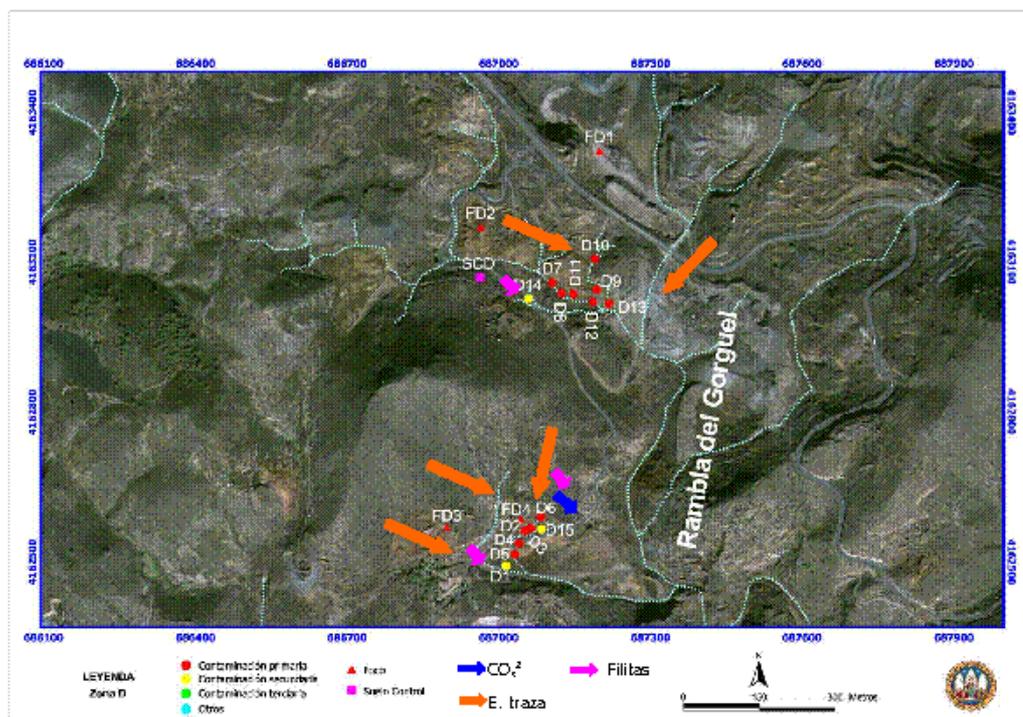


Figura 8.8. Cuadro resumen de los flujos en la zona del Gorguel

8.5. Zona E (Portman).

8.5.1. Contaminación primaria.

Los sedimentos E3 y E11 fueron recogidos en zonas de vertido directo, por lo que presentan contaminación primaria.

Ambas muestras tienen valores de pH básicos y elevada conductividad eléctrica, junto con escaso contenido en carbonato cálcico y materia orgánica. A pesar de que no se ha detectado la presencia de carbonatos mediante el método del calcímetro de Bernard, ambas muestras presentan siderita en su composición, posiblemente heredada de la roca madre (Tablas 8.92 y 8.94).

Es destacable el porcentaje de limo, que junto con la fracción arcilla presentan mayor superficie específica y mayor reactividad que las arenas (Tabla 8.95).

Las fases mineralógicas más importantes son las jarositas, la siderita, el yeso y los oxihidróxidos de hierro (akaganeita) (Tabla 8.94).

El contenido en elementos traza es elevado (Tabla 8.96), como corresponde a materiales procedentes de la minería, y que han sufrido procesos de alteración.

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (1:5) (dS/m)	% CaCO ₃	%M.O
E3	7,5	7,2	126	3,7	<ld	<ld
E11	8,2	8,1	115	11,7	<ld	<ld
MEDIA	7,9	7,7	120,5	7,7	-	-

Tabla 8.92. Características generales de las muestras

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
E3	1	3	6	25	0,1	8	1	3	0,2	1	34	19,0
E11	2	5	8	28	0,1	9	1	5	0,3	1	23	15,5
MEDIA	1,5	4,0	7,0	26,5	0,1	8,5	1,0	4,0	0,3	1,0	28,5	17,3

Tabla 8.93. Contenido en elementos mayoritarios

	Filo14	Filo10	Filo7	Fsp	Cuarzo	Yeso	Jar	Hem	Aka	Mag	Sd	Amorfo
E3	5	4	4		17	13	17	3	10	5	14	10
E11		7	9	3	12	11	12	6	12	3	22	2
MEDIA	2,5	5,5	6,5	1,5	14,5	12,0	14,5	4,5	11,0	4,0	18,0	6,0

Tabla 8.94. Composición mineralógica

Filo: Filosilicatos; Jar: Jarosita; Hem: Hematites; Aka: Akaganeita; Fsp: Feldespatos; Sd: Siderita; Mag: Magnetita

	Seco				Húmedo			
	Arcilla	Limo	Arena		Arcilla	Limo	Arena	
	<2µm	2-50µm	50-2000µm		<2µm	2-50µm	50-2000µm	
E3	1	5	94	Arenosa	1	3	96	Arenosa
E11	3	21	76	Franco-arenosa	3	22	75	Franco-arenosa
MEDIA	2	13	85	Areno-franca	2	13	86	Areno-francoa

Tabla 8.95. Resultados del análisis granulométrico

	Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
E3	9830	2231	90	254491	2365	135	9381	549
E11	5404	2098	68	211295	720	166	7059	<ld
MEDIA	7617	2165	79	232893	1543	151	8220	275

Tabla 8.96. Contenido de elementos traza

8.5.2. Contaminación secundaria.

Los sedimentos E1 y E2 han sido recogidos en la Bahía de la Portman, en primera línea de costa. Sobre ellos ha tenido lugar un proceso de granoselección, por lo que son menos reactivos y se clasifican como afectados por contaminación secundaria.

Son el resultado de la sedimentación de residuos vertidos directamente al mar y afectados por las corrientes marinas, que provocan un lavado de la fracción más fina, regresando a la Bahía la fracción arenosa (Martínez-Sánchez et al., 2008f). Ambos puntos tienen valores de pH neutros, y el análisis químico total muestra que es elevado el porcentaje de óxidos de hierro, junto con sílice, SO₃ y Al₂O₃ (Tablas 8.97 y 8.98).

En su composición mineralógica es de destacar la presencia de siderita, sulfatos (yeso y jarositas), magnetita, filosilicatos y cuarzo (Tabla 8.99). Además presentan textura arenosa, ya que al tener lugar el proceso de granoselección la fracción fina se ha perdido por influencia de las corrientes marinas (Tabla 8.100).

Finalmente, el contenido en elementos traza es elevado, como en el caso de los puntos afectados por vertido directo, pero la concentración total es menor que en los puntos E3 y E11 (Tabla 8.101).

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (1:5) (dS/m)	% CaCO ₃	%M.O
E1	7,5	7,3	170	0,2	<ld	<ld
E2	7,4	7,2	126	3,5	<ld	<ld
MEDIA	7,5	7,3	148,0	1,9	<ld	<ld

Tabla 8.97. Características generales de las muestras

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
E1	1	3	6	25	0,1	8	1	3	0,2	1	34	13,4
E2	1	4	8	27	0,2	7	1	1	0,2	1	38	19,2
MEDIA	1,0	3,5	7,0	26,0	0,2	7,5	1,0	2,0	0,2	1,0	36,0	16,3

Tabla 8.98. Contenido en elementos mayoritarios

	Filo14	Filo10	Filo7	Cuarzo	Yeso	Jar	Hem	Aka	Mag	Sid	Amorfo
E1	14	6	11	15	7	9	5	8	4	18	3
E2	9	5	6	9	4	6	9	1	2	40	1
MEDIA	12	6	9	12	6	8	7	5	3	29	2

Tabla 8.99. Composición mineralógica

Filo: Filosilicatos; Jar: Jarosita; Hem: Hematites; Aka: Akaganeita; Fsp: Feldespatos; Sd: Siderita; Mag: Magnetita

	Seco				Húmedo			
	Arcilla	Limo	Arena		Arcilla	Limo	Arena	
	<2µm	2-50µm	50-2000µm		<2µm	2-50µm	50-2000µm	
E1	1	2	97	Arenosa	1	2	97	Arenosa
E2	1	7	92	Arenosa	1	3	96	Arenosa
MEDIA	1	5	95	Arenosa	1	3	97	Arenosa

Tabla 8.100. Resultados del análisis granulométrico

	Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
E1	6398	709	65	385922	554	68	8350	78
E2	6600	1003	74	505894	868	147	10806	11
MEDIA	6499	856	69	445908	711	107	9578	44

Tabla 8.101. Contenido de elementos traza

8.5.3. Contaminación terciaria.

Los puntos de muestreo E7, E8, E9 y E10 tienen una afectación terciaria por elementos traza. Su pH es elevado y a excepción del sedimento E7, presentan carbonato cálcico (Tabla 8.102).

En la composición mineralógica se ha cuantificado calcita y dolomita, así como filosilicatos y feldespatos (Tabla 8.104). La textura es arenosa y el contenido en elementos traza es significativamente menor que los sedimentos descritos anteriormente (Tablas 8.105 y 8.106).

Estos materiales aparecen mezclados con filitas y carbonatos, procedentes de la roca encajante y suelos circundantes. Tienen la influencia de las balsas de estériles de la Sierra Minera, pero a lo largo de la rambla ha tenido lugar una atenuación natural de la contaminación.

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (1:5) (dS/m)	% CaCO ₃	%M.O
E7	7,7	7,4	206	0,7	<ld	1,3
E8	7,5	7,3	214	0,5	4,9	0,7
E9	7,7	7,1	244	0,2	<ld	<ld
E10	8,3	7,7	228	0,2	1,3	<ld
MEDIA	7,8	7,4	223,0	0,4	2,5	0,6

Tabla 8.102. Características generales de las muestras

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
E7	1	3	22	46	0,1	1	4	1	1	0,2	14	6,6
E8	0,5	2	14	46	1	1	2	5	1	0,2	13	13,1
E9	1	3	18	49	0,1	1	3	1	1	0,3	16	6,4
E10	1	3	18	49	0,1	1	3	1	1	0,3	16	6,1
MEDIA	0,9	2,8	18,0	47,5	0,3	1,0	3	2	1,0	0,3	14,8	8,1

Tabla 8.103. Contenido en elementos mayoritarios

	Filo14	Filo10	Filo7	Fsp	Cuarzo	Hem	Cal	Dol	Gol	Amorfo
E7	22	14	17	7	22	7			8	2
E8		21	8	5	47	4	11			4
E9	21	14	9	6	27	5	5	5	6	2
E10	17	15	12	8	33	6			7	2
MEDIA	15,0	16,0	11,5	6,5	32,3	5,5	4	1	5,3	2,5

Tabla 8.104. Composición mineralógica

Filo: Filosilicatos; Hem: Hematites; Cal: Calcita; Dol: Dolomita; Fsp: Feldespatos

	Seco				Húmedo			
	Arcilla	Limo	Arena		Arcilla	Limo	Arena	
	<2µm	2-50µm	50-2000µm		<2µm	2-50µm	50-2000µm	
E7	1	15	84	Areno-franca	0	6	94	Arenosa
E8	0	4	96	Arenosa	0	8	92	Arenosa
E9	0	4	96	Arenosa	0	5	95	Arenosa
E10	0	5	95	Arenosa	0	7	93	Arenosa
MEDIA	0	7	93	Arenosa	0	6	94	Arenosa

Tabla 8.105. Resultados del análisis granulométrico

	Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
E7	3670	2041	14	118349	563	119	1528	402
E8	3049	3002	14	189962	664	150	1735	173
E9	8293	4688	26	159512	1062	429	3024	<ld
E10	4817	3439	25	144509	601	424	2890	<ld
MEDIA	4957	3293	20	153083	723	281	2294	144

Tabla 8.106. Contenido de elementos traza

8.5.4. Sin influencia minera.

Ninguno de estos sedimentos está afectado por la actividad minera, por lo que esta rambla, formada por los Barrancos de la Culebra y el Moro, pueden considerarse un ejemplo de rambla control.

Las concentraciones de elementos traza que presentan se debe a que en la zona los valores geógenicos son elevados, que representan el valor de fondo (Martínez-Sánchez et al., 2007).

En su composición mineralógica destaca la presencia de carbonatos (calcita, dolomita y aragonito) filosilicatos y feldespatos, así como de óxidos de hierro y manganeso (Tablas 8.107 a 8.111).

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (1:5) (dS/m)	% CaCO ₃	% M.O
E4	8,5	7,9	148	2,5	43,0	<ld
E5	7,5	7,0	206	0,2	1,2	<ld
E6	7,9	7,7	228	0,4	28,7	0,5
E12	8,5	7,9	148	2,5	43,0	<ld
MEDIA	8,1	7,6	182,5	1,4	29,0	0,2

Tabla 8.107. Características generales de las muestras

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
E4	1	2	7	26	0,1	1	1	46	0,3	0,5	4	37,3
E5	0,1	7	13	30	0,1	0,2	4	15	0,5	0,1	4	26,4
E6	0,5	1	16	47	0,2	1	3	9	1	0,2	9	11,5
E12	1	2	7	26	0,1	1	1	46	0,3	0,5	4	37,3
MEDIA	0,7	3,0	10,8	32,3	0,1	0,8	2,3	29,0	0,5	0,3	5,3	28,1

Tabla 8.108. Contenido en elementos mayoritarios

	Filo10	Filo7	Fsp	Cuarzo	Hem	Cal	Dol	Ara	Amorfo
E4	6	2	2	8	16	8	9	41	8
E5	3			3		2	89		3
E6	23	5	7	40		16	7		3
E12	5	2	2	8	16	7	10	42	9
MEDIA	9,3	2,3	2,8	14,8	8,0	8,3	28,8	20,8	5,8

Tabla 8.109. Composición mineralógica

Filo: Filosilicatos; Jar: Jarosita; Hem: Hematites; Fsp: Feldespatos; Cal: Calcita; Dol; Dolomita; Ara: Aragonito

	Seco				Húmedo			
	Arcilla	Limo	Arena		Arcilla	Limo	Arena	
	<2 μ m	2-50 μ m	50-2000 μ m		<2 μ m	2-50 μ m	50-2000 μ m	
E4	1	11	88	Areno-franca	0	13	87	Areno-franca
E5	3	13	84	Areno-franca	0	8	92	Arenosa
E6	1	10	89	Arenosa	1	9	90	Arenosa
E12	1	11	88	Areno-franca	0	12	88	Areno-franca
MEDIA	2	11	87	Areno-franca	0	11	89	Arenosa

Tabla 8.110. Resultados del análisis granulométrico

	Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg μ g/kg
E4	2000	25	33	12750	22	13	1550	5021
E5	135	63	6	161116	40	171	864	114
E6	1494	538	12	46315	327	129	1584	839
E12	2005	20	33	12749	20	10	1450	5020
MEDIA	1407	163	21	58233	103	82	1387	2749

Tabla 8.111. Contenido de elementos traza

8.5.5. Punto de muestreo control.

El punto de control de la zona de Portman presenta valores de pH básicos, contenido en carbonato cálcico elevado (12%) y un porcentaje de materia orgánica del 1,8% (Tabla 8.112).

Mineralógicamente, la muestra está formada por carbonatos (calcita y dolomita), filosilicatos, cuarzo y feldespatos, al igual que el resto de puntos de control de las otras zonas (Tabla 8.114).

Su textura, tanto en húmedo como en seco, es areno-franca y la concentración de elementos traza es baja (Tablas 8.115 y 8.116). Como no está influida por la actividad minera, podemos decir que los elementos traza tienen un origen natural.

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (1:5) (dS/m)	% CaCO ₃	%M.O
SCE	8,2	7,2	112	0,3	11,6	1,8

Tabla 8.112. Características generales de las muestras

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
SCE	0,1	6	13	31	0,3	4	15	0,5	0,1	4	26,4

Tabla 8.113. Contenido en elementos mayoritarios

	Filo14	Filo10	Filo7	Fsp	Cuarzo	Cal	Dol	Amorfo
SCE	2	9	2	15	37	25	8	1

Tabla 8.114. Composición mineralógica

Filo: Filosilicatos; Hem: Hematites; Fsp: Feldespatos; Cal: Calcita; Dol; Dolomita

	Seco				Húmedo			
	Arcilla	Limo	Arena		Arcilla	Limo	Arena	
	<2µm	2-50µm	50-2000µm		<2µm	2-50µm	50-2000µm	
SCD	3	12	85	Areno-franca	2	13	85	Areno-franca

Tabla 8.115. Resultados del análisis granulométrico

	Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
SCE	67	10	0,5	699	12	14	200	0,04

Tabla 8.116. Contenido de elementos traza

8.5.6. Análisis estadístico.

El análisis de correlaciones entre el contenido en elementos traza, las características analíticas generales y la textura en la zona de Portman (Tabla 8.117) muestra una correlación negativa entre el porcentaje en carbonato cálcico y el contenido total de cinc, plomo, arsénico y cobre, lo que concuerda con lo obtenido en otras zonas, en las que los sedimentos con mayor contenido en carbonato cálcico presentan menores concentraciones de elementos traza.

Los elementos presentan correlaciones entre ellos y que podemos resumir en:

- Cinc: positivamente correlacionado con el plomo, el cadmio, el hierro, el arsénico y el manganeso.
- Plomo: positivamente correlacionado con el arsénico y cobre.
- Hierro: presenta una correlación positiva con el arsénico y el manganeso, que a su vez están correlacionados entre sí.
- Mercurio: en esta zona se correlaciona negativamente con el hierro, ya que puede formar parte de la estructura cristalina de los óxidos de hierro.

En el análisis de correlaciones entre el contenido total en elementos traza y la mineralogía (Tabla 8.118) destacan las elevadas correlaciones entre los elementos traza y los sulfatos, tanto jarositas como yeso y goldichita.

Además, el cinc, cadmio, hierro, arsénico y manganeso total se correlacionan negativamente con la calcita, lo que concuerda con los resultados de la Tabla 8.117.

El cadmio y el arsénico están también correlacionados con los óxidos y oxihidróxidos de hierro. Finalmente, cinc, cadmio, hierro y manganeso aparecen positivamente correlacionados con la siderita, principal carbonato en las muestras de la Bahía.

En la Tabla 8.119 se recogen los resultados del análisis de correlaciones entre el contenido total en elementos traza y los resultados del análisis químico total. Son de destacar las correlaciones entre cinc, cadmio, hierro, arsénico y manganeso y el porcentaje de SO_3 , lo que concuerda con la relación entre éstos y las jarositas, goldichita y yeso. Además, existen correlaciones positivas entre estos elementos y los óxidos de hierro.

	pH _{H₂O}	pH _{KCl}	Eh	CE	CaCO ₃	MO	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Hg	Arcilla	Limo
pH _{KCl}	0,78*															
Eh	-0,21	-0,20														
CE	0,22	0,55**	-0,60*													
CaCO ₃	0,69*	0,58**	-0,14	-0,05												
MO	-0,29	-0,26	-0,46	0,23	-0,39											
Zn	-0,49	-0,24	-0,14	0,24	-0,51**	0,19										
Pb	-0,37	-0,23	0,42	0,01	-0,64*	0,03	0,67*									
Cd	-0,32	-0,02	-0,37	0,27	-0,26	0,10	0,72*	0,15								
Fe	-0,71*	-0,38	-0,17	0,19	-0,63*	0,39	0,80*	0,44	0,71*							
As	-0,64*	-0,37	-0,21	0,18	-0,55**	0,23	0,94*	0,54**	0,71*	0,81*						
Cu	-0,16	-0,18	0,63*	-0,12	-0,52**	-0,25	0,35	0,81*	-0,15	0,17	0,20					
Mn	-0,45	-0,10	-0,45	0,47	-0,43	0,32	0,88*	0,34	0,82*	0,87*	0,90*	0,05				
Hg	0,65*	0,56**	-0,22	0,04	0,91*	-0,47	-0,33	-0,53**	-0,11	-0,50**	-0,42	-0,49	-0,30			
Arcilla	0,09	0,23	-0,65*	0,69*	-0,20	0,58**	0,13	-0,13	0,30	0,18	0,17	-0,24	0,40	-0,34		
Limo	0,70*	0,70*	-0,36	0,64*	0,38	0,04	-0,53**	-0,37	-0,32	-0,52**	-0,60*	-0,25	-0,33	0,29	0,52	
Arena	-0,65*	-0,68*	0,43	-0,69*	-0,31	-0,13	0,46	0,36	0,25	0,44	0,52**	0,26	0,23	-0,22	-0,63*	-0,99*

Tabla 8.117. Matriz de correlación de Pearson entre el contenido total de elementos traza, características analíticas generales y granulometría de los sedimentos.

(**) p<0,05; (*) p<0,01

	Filo14	Filo10	Filo7	Fsp	Cuarzo	Yeso	Calcita	Dolomita	Aragonito	Goldichita	Jarrosita	Hematites	Akaganeita	Magnetita	Siderita	Amorfo
Filo10	0,17															
Filo7	0,77*	0,42														
Fsp	0,34	0,16	0,31													
Cuarzo	0,07	0,88*	0,26	0,24												
Yeso	0,37	-0,18	0,53**	-0,03	-0,15											
Calcita	-0,43	0,38	-0,42	0,31	0,60*	-0,66*										
Dolomita	-0,30	-0,32	-0,50**	-0,37	-0,34	-0,44	-0,03									
Aragonito	-0,35	-0,31	-0,42	-0,36	-0,36	-0,46	0,10	-0,01								
Goldichita	0,89*	0,36	0,76*	0,10	0,25	0,19	-0,31	-0,20	-0,23							
Jarrosita	-0,13	-0,45	-0,04	-0,22	-0,35	0,80*	-0,45	-0,25	-0,25	-0,32						
Hematites	-0,27	-0,54**	-0,26	-0,05	-0,63*	-0,09	-0,17	-0,15	0,78*	-0,40	0,07					
Akaganeita	-0,15	-0,37	0,10	-0,15	-0,28	0,79*	-0,40	-0,22	-0,22	-0,28	0,84*	0,17				
Magnetita	-0,14	-0,41	-0,04	-0,29	-0,26	0,80*	-0,40	-0,22	-0,22	-0,28	0,96*	0,05	0,89*			
Siderita	-0,03	-0,44	0,02	0,14	-0,49	0,56**	-0,45	-0,25	-0,25	-0,32	0,74*	0,17	0,49	0,54**		
Amorfo	-0,29	-0,46	-0,44	-0,39	-0,48	0,09	-0,25	-0,12	0,49	-0,42	0,46	0,49	0,07	0,37	0,46	
Zn	0,47	-0,23	0,34	0,12	-0,27	0,79*	-0,62*	-0,47	-0,32	0,13	0,67*	0,07	0,47	0,58**	0,69*	0,37
Pb	0,68*	0,35	0,65*	0,08	0,29	0,59**	-0,43	-0,43	-0,50**	0,58**	0,19	-0,40	0,13	0,16	0,18	-0,17
Cd	0,12	-0,47	0,15	0,29	-0,51**	0,62*	-0,51**	-0,31	-0,10	-0,27	0,59**	0,51**	0,64*	0,55**	0,63*	0,29
Fe	0,24	-0,29	0,22	0,23	-0,38	0,61*	-0,61*	-0,14	-0,47	-0,12	0,57**	0,02	0,35	0,40	0,84*	0,31
As	0,32	-0,22	0,23	0,09	-0,20	0,80*	-0,53**	-0,39	-0,43	-0,03	0,77*	-0,04	0,52**	0,70*	0,69*	0,42
Cu	0,60*	0,35	0,44	-0,07	0,28	0,28	-0,36	-0,02	-0,46	0,66*	-0,05	-0,54**	-0,07	-0,05	-0,07	-0,34
Mn	0,11	-0,43	0,12	0,10	-0,45	0,76*	-0,58**	-0,34	-0,28	-0,23	0,85*	0,21	0,64*	0,72*	0,91*	0,48
Hg	-0,37	-0,25	-0,42	-0,40	-0,32	-0,46	0,13	-0,02	0,99*	-0,24	-0,24	0,76*	-0,22	-0,19	-0,28	0,51**

Tabla 8.118. Matriz de correlación de Pearson entre el contenido total de elementos traza y la composición mineralógica de los sedimentos.
(**) $p < 0,05$; (*) $p < 0,01$

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
MgO	-0,21											
Al ₂ O ₃	-0,28	-0,05										
SiO ₂	-0,17	-0,33	0,91*									
P ₂ O ₅	-0,34	-0,18	0,12	0,31								
SO ₃	0,65*	0,08	-0,63*	-0,54**	-0,21							
K ₂ O	-0,61*	0,37	0,83*	0,60*	0,03	-0,69*						
CaO	-0,09	-0,17	-0,41	-0,43	-0,14	-0,36	-0,26					
TiO ₂	-0,27	-0,30	0,93*	0,99*	0,34	-0,63*	0,67*	-0,35				
MnO	0,69*	-0,05	-0,75*	-0,64*	-0,29	0,95*	-0,84*	-0,14	-0,74*			
Fe ₂ O ₃	0,47	-0,04	-0,36	-0,26	-0,11	0,87*	-0,53	-0,61*	-0,38	0,83*		
1000°C	-0,18	0,15	-0,63*	-0,72*	-0,11	-0,14	-0,32	0,89*	-0,64*	0,05	-0,40	
Zn	0,53**	-0,15	-0,27	-0,14	-0,19	0,75*	-0,52**	-0,53**	-0,27	0,76*	0,92*	-0,42
Pb	0,38	-0,19	0,37	0,55**	0,17	0,21	-0,03	-0,69*	0,44	0,15	0,50**	-0,78*
Cd	0,47	-0,09	-0,64*	-0,54**	-0,25	0,85*	-0,68*	-0,22	-0,62*	0,87*	0,80*	-0,09
Fe	0,29	0,14	-0,32	-0,26	0,01	0,74*	-0,42	-0,58**	-0,36	0,70*	0,91*	-0,34
As	0,34	-0,10	-0,32	-0,20	-0,07	0,77*	-0,47	-0,58**	-0,31	0,74*	0,95*	-0,38
Cu	0,17	0,00	0,54**	0,65*	-0,08	-0,09	0,28	-0,56**	0,57**	-0,15	0,16	-0,69*
Mn	0,54**	0,02	-0,56**	-0,46	-0,20	0,93*	-0,66*	-0,43	-0,58**	0,93*	0,96*	-0,19
Hg	0,10	-0,43	-0,39	-0,35	-0,18	-0,26	-0,41	0,95*	-0,31	-0,01	-0,45	0,76*

Tabla 8.119. Matriz de correlación de Pearson entre el contenido total de elementos traza y los elementos mayoritarios.
(**) p<0,05; (*) p<0,01

El análisis de componentes de esta zona ha permitido agrupar todas las variables en 3 factores (Tabla 8.120):

- F1: conductividad eléctrica, Na₂O, SO₃, MnO, Fe₂O₃, yeso, jarosita, akaganeita, magnetita, siderita, cinc, cadmio, hierro, arsénico y manganeso totales en la parte positiva, y en la negativa calcita, dolomita, K₂O y P₂O₅.
- F2: en este factor se incluyen, en su parte positiva, los amorfos y en la negativa Al₂O₃, SiO₂ y cuarzo, filosilicatos, goldichita, plomo y cobre totales.
- F3: en él se engloban el pH junto con el contenido en carbonato cálcico, CaO, aragonito y hematites en la parte negativa, quedando los feldespatos en la positiva junto a la materia orgánica.

Al representar gráficamente los factores 1 y 2, se observa como se agrupan en el primer cuadrante los puntos afectados por contaminación primaria y secundaria. Todos están situados en la Bahía de Portman y se caracterizan por elevado contenido en elementos traza, sulfatos, siderita y óxidos de hierro.

Por el contrario, en los cuadrantes segundo y tercero, aparecen las muestras en cuya composición mineralógica aparece calcita y dolomita, coincidiendo con las afectadas por contaminación terciaria (si además presentan amorfos) y las no influidas por la actividad minera (predominan los minerales de la roca original).

La representación de los factores 2 y 3 es similar, quedando agrupadas las muestras recogidas en la Bahía (Figura 8.9).

	F1	F2	F3
pH H ₂ O	-0,281	0,087	-0,765
pH KCl	0,102	-0,025	-0,820
Eh	-0,452	-0,712	0,081
CE	0,604	0,216	-0,228
CaCO ₃	-0,371	0,362	-0,799
MO	0,200	0,130	0,527
Na ₂ O	0,749	-0,252	-0,439
MgO	-0,070	0,426	0,602
Al ₂ O ₃	-0,551	-0,743	0,254
SiO ₂	-0,440	-0,865	0,122
P ₂ O ₅	-0,267	-0,084	0,224
SO ₃	0,949	0,177	0,132
K ₂ O	-0,734	-0,299	0,469
CaO	-0,341	0,545	-0,742
TiO ₂	-0,555	-0,799	0,117
MnO	0,958	0,244	-0,088
Fe ₂ O ₃	0,904	-0,099	0,333
Filo 14	0,167	-0,756	0,184
FIllo10	-0,431	-0,690	0,026
Filo 7	0,249	-0,833	0,072
Feldspatos	-0,018	-0,128	0,362
Cuarzo	-0,471	-0,528	0,166
Yeso	0,857	-0,304	0,206
Calcita	-0,678	0,240	0,025
Dolomita	-0,443	0,433	0,293
Aragonito	-0,156	0,373	-0,865
Goldichita	-0,117	-0,843	0,012
Jarosita	0,856	0,225	0,161
Hematites	0,312	0,457	-0,691
Akaganeita	0,760	0,145	0,025
Magnetita	0,776	0,186	0,102
Siderita	0,811	0,249	0,257
Amorfos	0,432	0,444	-0,312
Zn	0,869	-0,258	0,190
Pb	0,389	-0,783	0,237
Cd	0,827	0,154	0,037
Fe	0,745	0,002	0,481
As	0,834	-0,122	0,348
Cu	0,063	-0,744	0,216
Mn	0,946	0,105	0,215
Hg	-0,170	0,360	-0,877
Varianza (%)	36	21	17

Tabla 8.120. Factores obtenidos tras el análisis de componentes principales entre composición química, composición mineralógica, características analíticas generales y concentración de elementos traza

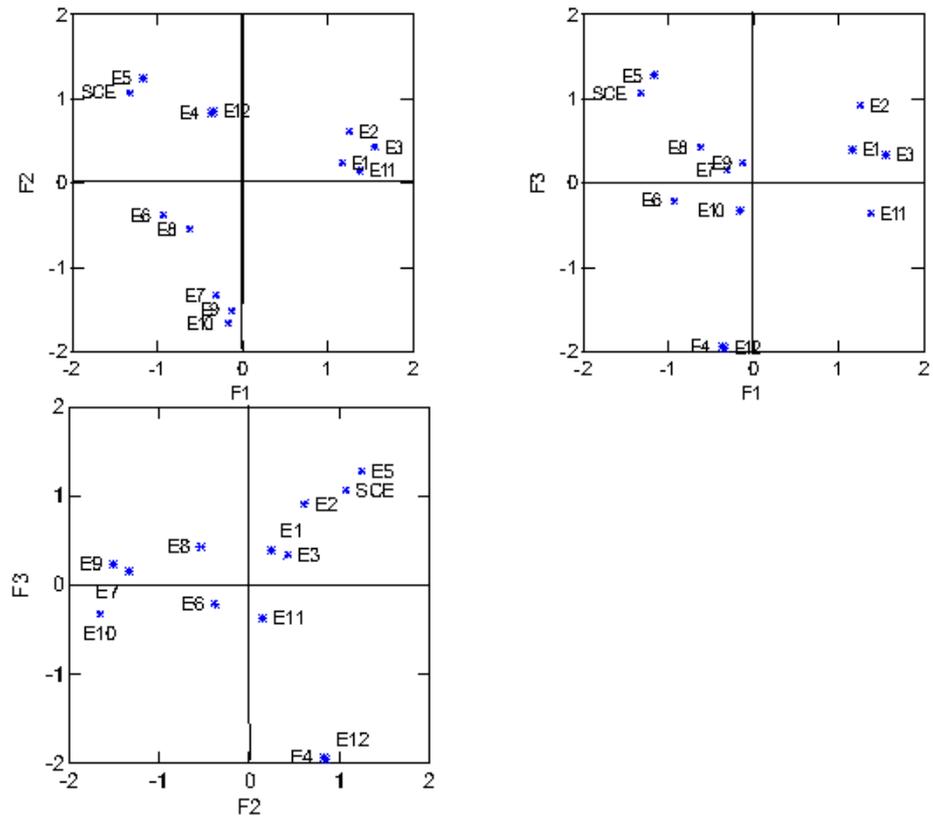


Figura 8.9. Representación gráfica de los factores obtenidos

8.5.7. Modelo conceptual de dispersión hídrica de la contaminación.

En la zona de Portman podemos decir que existe un flujo de material desde la Sierra Minera, tanto de elementos traza como de carbonatos, por lo que en las ramblas se da un proceso de atenuación natural de la contaminación, que al igual que en otras zonas, tiene lugar por mezcla con los materiales circundantes.

Además, la zona de la Bahía se encuentra aterrada por sedimentos procedentes del vertido del lavadero Roberto. Estos sedimentos han estado sometidos a la dinámica marina, especialmente los más próximos a la línea de costa, y a los efectos de las lluvias, escorrentías y otros vertidos, por lo que los materiales son muy heterogéneos. La granulometría define el origen del sedimento: la textura fina corresponde a estériles sin lavar y la textura gruesa a estéril lavado. El estéril sin lavar por el mar se caracteriza por tener una textura fina y sufre alteración supergénica, con oxidación de pirita, liberación de ácido sulfúrico y formación de óxidos de hierro y jarositas. Por último, la playa de Portman recibe aportes de ramblas que no han sufrido la influencia de la actividad minera de la zona (Figura 8.10).

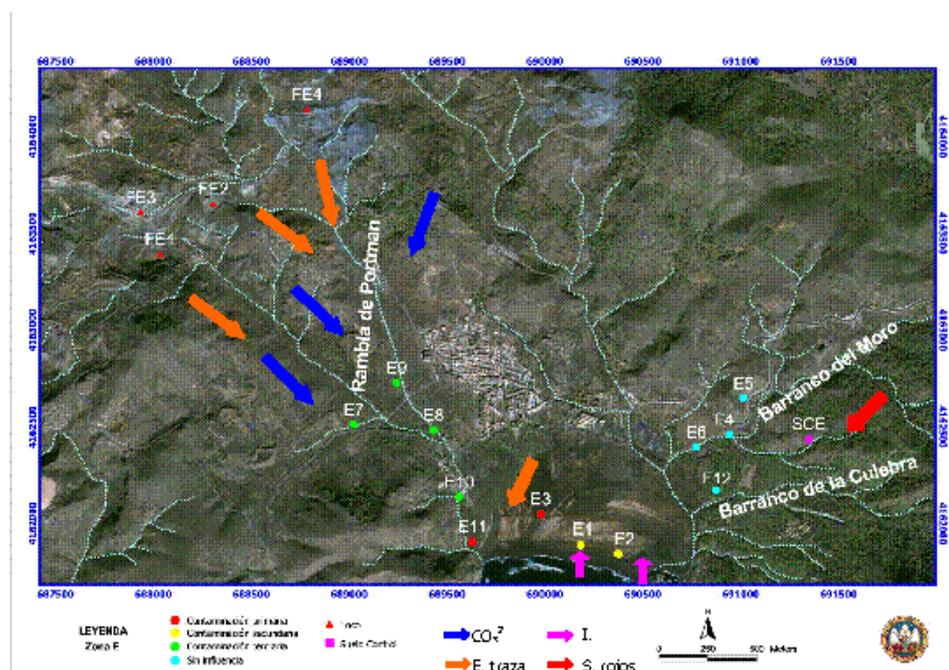


Figura 8.10. Cuadro resumen de los flujos en la zona de Portman

8.6. Estudio de las variaciones en elementos traza en las distintas zonas.

Al estudiar los contenidos totales de los elementos traza en las diferentes zonas, podemos concluir que los valores más elevados de cinc y cobre se dan en la zona del Cabezo Rajao.

En el caso del plomo existe una diferencia significativa entre las zonas del Gorguel y Llano del Beal y en el resto, los valores medios son más bajos.

Por otro lado, el cadmio presenta una distribución más uniforme en las distintas zonas, aunque es ligeramente superior en la zona de Portman (E).

En el caso del hierro, el contenido total es similar en el Llano del Beal (B), el Gorguel (D) y Portman (E), similar al manganeso, que también presenta un valor medio más elevado en las zonas B y E.

Es muy explicativo el diagrama que representa al arsénico, en el que se observa como en la zona del Gorguel los valores son mucho más elevados que en el resto de zonas. Finalmente, el contenido en mercurio es más elevado en el Cabezo Rajao y Portman, aunque las variaciones entre las muestras son considerables (Figura 8.11).

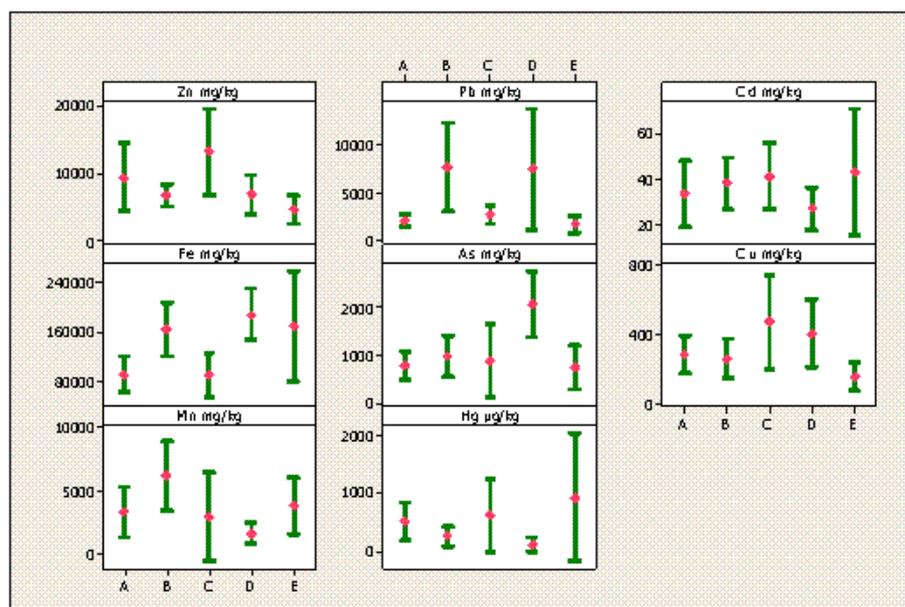


Figura 8.11. Comparación de los valores medios de elementos traza en las cinco zonas



**9. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LAS AGUAS
SUPERFICIALES**

9.1. Zona A- Lo Poyo.

9.1.1. Contaminación primaria.

Al agua recogida en el punto A5 está situada sobre la balsa de estériles de Lo Poyo, de manera que el contenido en elementos traza solubles es elevado.

La influencia de agua del mar es importante, dada la alta concentración de cloruros, bromuros, sodio y magnesio (Tablas 9.1 y 9.2), además de que el pH es básico.

La simulación realizada con MINTEQ muestra que el cinc soluble en esta muestra precipitaría en forma de carbonato (hidrocincita y smithsonita), al igual que el manganeso (rodocrosita) y el cadmio (otavita) (Anexo I).

Por otro lado, la evaporación del agua de esta muestra y el posterior análisis de las sales formadas por Difracción de Rayos X, dio como resultado la existencia de halita, hexahidrita y yeso. La presencia de halita corrobora la influencia del mar en esta muestra, mientras que la hexahidrita y el yeso muestran que el magnesio y el calcio precipitan como sulfatos dada la alta concentración de este anión (Tabla 9.2).

El agua recogida en el punto A9 presenta un valor de pH ácido y una concentración en elementos traza elevado, ya que está afectada por la balsa de estériles de Lo Poyo principalmente y por aguas de escorrentía a través de la Rambla del Beal, que transportan elementos traza (Figura 9.1). Está situada en una zona de recepción de lixiviados, que aparece a menudo encharcada por su posición topográfica deprimida. La influencia del agua del mar es menos importante, a juzgar por las bajas concentraciones de cloruros y bromuros.

La simulación con MINTEQ muestra que el plomo y el calcio precipitarían como sulfatos, particularmente anglesita y yeso.



Figura 9.1. Muestras recogidas en la zona de Lo Poyo

9.1.2. Contaminación secundaria.

Las muestras de agua afectadas por contaminación secundaria reciben aportes de material soluble y particulado de la Balsa de lo Poyo, así como están influidos por el contenido en elementos traza propios de los suelos rojos sobre los que se sitúan estos puntos.

Están afectados por las aguas del mar (cloruros, bromuros, sodio y magnesio) y también por nitratos procedentes de los suelos agrícolas situados en zonas topográficamente más altas.

La mezcla con carbonatos y aguas carbonatadas junto con la influencia del mar, provocan que el pH sea elevado, de manera que algunos elementos traza han precipitado (Hg, Cu, Mn y Pb), mientras que otros (Cd, Zn, Al y As) aparecen en forma soluble. En el caso del arsénico, la escasa concentración de calcio en el agua dificulta su precipitación en forma de arseniato de calcio. Además, la concentración de sulfatos y hierro también es escasa, por lo que tampoco puede precipitar formando parte de las jarositas (Tablas 9.1 y 9.2).

Los resultados obtenidos con el programa MINTEQ muestran que en las aguas A10 y A14, el aluminio soluble precipitaría en forma de oxihidróxido (diásporo), aunque también podrían formarse carbonatos, concretamente dolomita en el punto A10.

La evaporación del agua de la muestra A14 y el posterior análisis de las sales formadas por Difracción de rayos X, dio como resultado la existencia de halita y yeso. La presencia de halita corrobora la influencia del mar en esta muestra y el yeso la relación entre el calcio y los sulfatos.

Tras aplicar el modelo de especiación MINTEQ a la muestra A12, el resultado muestra que el cinc soluble precipitaría ligado a los carbonatos y el aluminio como oxihidróxido, igual que en la muestra A13.

9.1.3. Contaminación terciaria.

Las muestras de agua de los puntos A2 y A6 tienen pH básico, carbonatos solubles y concentraciones de elementos traza relativamente bajas, apareciendo únicamente en la solución cinc, cadmio, manganeso y aluminio.

Los resultados obtenidos con el programa MINTEQ para el agua A2 concluyen que el cadmio, el cinc y el manganeso precipitarían en forma de carbonatos, mientras que el aluminio lo haría en forma de oxihidróxido.

La simulación con MINTEQ en la muestra A6 estima que el plomo soluble precipitaría ligado a carbonatos (hidrocerusita y cerusita) o como hidróxido. El aluminio precipitaría como oxihidróxido (diásporo), el calcio como calcita y el hierro formaría hematites (Anexo I).

9.1.4. Muestras con origen diferente.

Las aguas A8 y A15 se recogieron en una zona encharcada, próxima a los sedimentos A8 y A15, que se corresponden con muestras de arena que se extrajeron del fondo para rellenar la playa, por lo que su composición difiere de las muestras anteriores. En ambos casos el pH es básico y el contenido en carbonatos solubles es elevado. A pesar de ello y debido a la influencia de la balsa de estériles, presentan concentraciones solubles de elementos traza, que pueden ir ligados tanto a cloruros como a sulfatos, ya que la concentración de estas sales es elevada. Es de destacar la concentración de arsénico (Tablas 9.1 y 9.2).

La simulación con MINTEQ muestra que los elementos traza pueden precipitar en forma de carbonatos, cerusita (Pb), otavita (Cd), rodocrosita (Mn) o smithsonita (Zn) (Anexo I).

Para la muestra A15 se ha evaporado el agua y se ha realizado un análisis de la composición mineralógica del residuo, que da como resultado la formación de halita, yeso y hexahidrita, debido a la influencia marina (cloruros y sulfatos).

El agua recogida en el punto A7 se corresponde con un suelo rojo, típico de la zona. El pH es básico y la concentración de elementos solubles no es muy elevada, aunque presenta cadmio soluble. Al aplicar el modelo MINTEQ a esta muestra se obtiene que el aluminio precipitaría como diásporo y el hierro formando hematites (Anexo I).

		pH	Eh mV	CE dS/m	TDS mg/l	Zn mg/l	Pb mg/l	Cd mg/l	Fe mg/l	As µg/l	Hg µg/l	Cu mg/l	Mn mg/l	Al mg/l
Cont. 1ª	A5	7,7	210	42,4	27136	70	1,3	1,2	<ld	<ld	<ld	<ld	3,4	0,5
	A9	3,3	383	22,8	14592	4000	3,1	3,5	9,2	7,6	<ld	9,7	2040,0	<ld
Cont. 2ª	A10	8,4	228	16,1	10298	0,07	<ld	0,7	0,2	2,2	<ld	<ld	<ld	0,4
	A12	8,5	251	7,5	4800	0,8	<ld	0,03	0,03	2,6	<ld	<ld	<ld	0,2
	A13	7,1	141	8,0	5120	0,1	<ld	0,6	<ld	2,3	<ld	<ld	<ld	0,2
	A14	7,8	114	15,5	9946	0,1	<ld	2,6	<ld	1,1	<ld	<ld	<ld	0,4
Cont. 3ª	A2	7,2	174	1,1	723	30	<ld	0,8	<ld	<ld	<ld	<ld	11,5	0,2
	A6	7,3	302	1,6	1024	<ld	1,2	0,002	0,04	3,3	<ld	<ld	<ld	0,2
Distinto origen	A7	7,1	144	0,7	424	0,1	0,005	<ld	0,5	<ld	<ld	<ld	<ld	<ld
	A8	8,7	225	15,1	9606	0,04	<ld	0,3	0,1	7,9	<ld	<ld	<ld	0,2
	A15	7,6	255	13,7	8794	3,0	0,71	0,9	<ld	0,05	<ld	<ld	1,7	0,2

Tabla 9.1. Características de las aguas y contenido en elementos traza de la zona A

		Na ⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	Ca ²⁺ mg/l	Mg ²⁺ mg/l	F ⁻ mg/l	Cl ⁻ mg/l	NO ₂ ⁻ mg/l	Br ⁻ mg/l	NO ₃ ⁻ mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l	CO ₃ ²⁻ mg/l
Cont. 1ª	A5	14591	263	1192	2347	1	20236	12	94	6	10629	2976
	A9	7527	423	446	4716	19	248	-	48	32	41326	-
Cont. 2ª	A10	4304	64	420	700	0,4	7015	1	29	90	2573	1051
	A12	2500	17	385	89	0,3	4356	2	12	291	2000	101
	A13	2300	65	450	454	0,3	3300	2	16	249	1987	1027
	A14	3680	76	438	627	1	5561	4	25	87	1671	1701
Cont. 3ª	A2	53	25	134	50	-	96	0,1	1	7	378	593
	A6	199	13	190	49	0,4	376	-	2	86	233	169
Distinto origen	A7	56	25	120	18	0,3	89	-	1	6	181	123
	A8	4187	128	117	379	1	4189	2	22	6	3697	796
	A15	3906	110	171	496	1	3509	1	19	4	2659	2013

Tabla 9.2. Contenido en iones solubles en la zona A

9.2. Zona B- Llano del Beal.

9.2.1. Contaminación primaria.

Las 4 muestras de agua con elevada influencia minera tienen un pH ácido, elevado contenido en elementos traza solubles, así como sulfatos y cloruros. En ningún caso se ha determinado la presencia de carbonatos solubles (Tablas 9.3 y 9.4)

Para las muestras B8 y B12 se ha evaporado el agua, para posteriormente analizar la composición mineralógica con difracción de Rayos X. En ambos casos se han cuantificado gran cantidad de sulfatos hidratados; en el caso de la muestra B8, yeso, polihalita, bianchita, paracoquimbita, halotrichita y siderotilo y en la muestra A12 yeso, bianchita, paracoquimbita y coquimbita (Anexo I).

Además, la aplicación del modelo de especiación MINTEQ en la muestra B8 concluye que existe la posibilidad de que el hierro precipite en forma de hidroxicloruro mientras que en la B12, se formaría alunita (Anexo I).

Las muestras B9, B10, B13 y B14, a pesar de encontrarse en una zona de sedimentos clasificada como afectada por contaminación terciaria, ya que tienen influencia de la Sierra Minera pero han sufrido una atenuación por la mezcla con filitas y carbonatos, la proximidad a la fuente y al tratarse de aguas de escorrentía, hace que sus características no sólo sean similares a las aguas afectadas por contaminación primaria, sino que incluso su contaminación sea más importante (Tablas 9.3 y 9.4).

La influencia de las balsas es importante, presentando todas las aguas pH ácido y elevado contenido en elementos traza, posiblemente ligados a sulfatos.

A la hora de estudiar la formación de sales solubles, y como ya se ha comentado, se ha estudiado la composición mineralógica del residuo tras evaporar el agua. En el residuo de la muestra B10 se ha cuantificado yeso, hexahidrita, carnalita, bianchita, copiapita y siderotilo, es decir sulfatos de hierro y cinc con diferentes grados de hidratación y cloruros de magnesio y potasio.

En el residuo de la muestra B14 se ha cuantificado yeso, polihalita, bianchita, coquimbita y paracoquimbita, que como en el caso anterior, son sulfatos hidratados de hierro y cinc (Anexo I).

El modelo MINTEQ se ha aplicado en las 4 muestras y los resultados obtenidos estiman la precipitación de anglesita, yeso y hidroxidoruro de hierro en las aguas B9 y B10, diásporo en las aguas B13 y B14, así como hidroxiclruo de hierro y yeso en la B13 (Anexo I).

		pH	Eh mV	CE dS/m	TDS mg/l	Zn mg/l	Pb mg/l	Cd mg/l	Fe mg/l	As µg/l	Hg µg/l	Cu mg/l	Mn mg/l	Al mg/l
Cont 1 ^a	B7	3,2	422	1,2	774	100	1,6	0,6	0,4	0,2	<ld	0,3	13	52,7
	B8	3,0	500	0,9	616	83	1,3	0,7	7,3	0,6	<ld	0,5	6	55,8
	B11	5,3	367	24,6	15744	220	0,4	1,4	0,5	0,3	<ld	0,1	2200	0,4
	B12	4,5	412	1,4	915	41	3,4	0,05	<ld	<ld	<ld	0,1	55	3,0
	B9	3,5	540	8,8	5619	1050	4,3	7,6	2,6	3,8	<ld	1,6	110	8,3
	B10	3,9	484	7,8	4998	1015	4,9	4,5	1,8	2,0	<ld	0,6	75	9,0
	B13	5,6	394	3,6	2323	134	3,1	0,7	0,1	0,9	<ld	0,1	35	0,6
	B14	5,7	235	3,3	2093	216	0,7	2,9	<ld	2,0	<ld	0,05	10	0,6

Tabla 9.3. Características de las aguas y contenido en elementos traza de la zona B

		Li ⁺ mg/l	Na ⁺ mg/l	NH ₄ ⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	Ca ²⁺ mg/l	Mg ²⁺ mg/l	F ⁻ mg/l	Cl ⁻ mg/l	NO ₂ ⁻ mg/l	Br ⁻ mg/l	NO ₃ ⁻ mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l
Cont 1 ^a	B7	0,1	13	2	28	92	45	1	25		1	4	793
	B8	0,1	4	1	21	48	42	0,3	8		1	3	690
	B11		904		4367	673	9892	10	1733		1	164	32242
	B12		47	2	135	89	180	0,3	68		1	11	798
	B9	1	191		228	603	1505	23	181		2	80	16792
	B10	1	170		200	647	1227	24	165		2	79	17001
	B13	0,2	243		8	753	198	0,4	451	1	2	15	2223
	B14	0,2	241		6	656	227	0,3	457	1	1	13	2146

Tabla 9.4. Contenido en iones solubles en la zona B

9.3. Zona C- Cabezo Rajao.

9.3.1. Contaminación primaria.

El agua recogida en el punto C1 tiene un pH ácido, al igual que la C3, C4, C5 y C7, mientras que la recogida en el punto C2 tiene un valor neutro de pH, ya que tiene carbonatos solubles que disminuyen la acidez (Tabla 9.5).

El agua del punto C1 presenta elevadas concentraciones de elementos traza, ya que en este punto se recogen las aguas de escorrentía de gran número de balsas de estériles. Destacan las elevadas concentraciones de arsénico y aluminio, pudiendo provenir éste de la alteración de las filitas del material original.

Los resultados del modelo MINTEQ muestran que bajo las condiciones actuales pueden precipitar muchas sales solubles, principalmente sulfatos, ya que la concentración de éstos es elevada (Tabla 9.6 y Anexo I).

El agua recogida en el punto de muestreo C2 (Figura 9.2) tiene menor concentración de elementos traza que la C1, debido a la presencia de carbonatos solubles, procedentes de los aportes procedentes de una balsa estabilizada con cubierta carbonatada. Sin embargo, y aunque en baja concentración, parte del arsénico queda soluble.

El modelo MINTEQ concluye que los elementos solubles pueden precipitar como óxidos, principalmente de hierro, y carbonatos, ya sea de calcio, magnesio, cinc o cadmio (Anexo I).

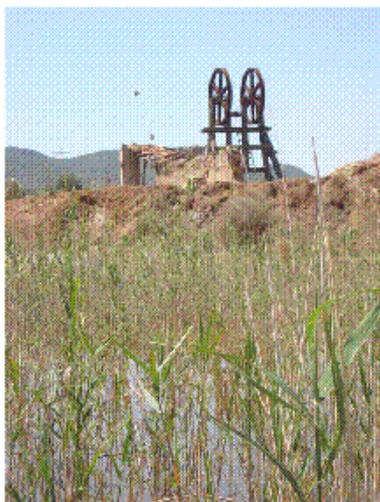


Figura 9.2. Muestra de agua de escorrentía tomada en la zona del Cabezo Rajao

El agua del punto C3 está muy cercana a los focos de contaminación y caracterizada por un pH muy ácido, elevadas concentraciones de elementos traza y de sales solubles, sobre todo de sulfatos, formados como consecuencia de la oxidación de las piritas (Tablas 9.5 y 9.6).

El modelo MINTEQ muestra que la mayoría de elementos considerados precipitarían en forma de sulfatos (Anexo I).

Los puntos C3, C4, C5 y C7 presentan características similares entre sí, al estar situados muy cerca unos de otros y estar afectados por las mismas balsas de estériles. Todas estas aguas tienen valores ácidos de pH, muchas sales solubles, principalmente sulfatos, y elevadas concentraciones de elementos traza en forma soluble, destacando el arsénico, que permanece soluble, y el cinc y el cadmio por ser más móviles.

En todas ellas, el programa MINTEQ establece que en las condiciones actuales precipitarían óxidos de hierro y los metales formando sulfatos.

El punto C8 está situado en la parte alta del Cabezo Rajao y recoge aportes de las balsas, pudiendo precipitar jarositas, alunita y yeso al aplicar el modelo de especiación MINTEQ. Además, puede aparecer hematites, goethita, lepidocrocita, maghemita, ferrihidrita y oxihidróxidos de aluminio (diásporo y gibbsita) (Anexo I).

Por otro lado, el punto C6 está situado sobre roca volcánica y al igual que las anteriores, está afectado por contaminación primaria, presentando arsénico

en forma soluble. El programa MINTEQ muestra que pueden precipitar óxidos y oxihidróxidos de hierro y aluminio, junto con yeso, alunita y jarositas.

		pH	Eh mV	CE dS/m	TDS mg/l	Zn mg/l	Pb mg/l	Cd mg/l	Fe mg/l	As µg/l	Hg µg/l	Cu mg/l	Mn mg/l	Al mg/l
Cont. 1ª	C1	2,1	489	14,6	9344	905	0,28	2,8	5900	11675,6	<ld	12,9	175	7300
	C2	7,7	293	4,3	2778	4,2	0,003	0,41	0,08	1,27	<ld	0,003	<ld	0,288
	C3	4,2	367	27,3	17472	20000	4	66	0,68	10,34	<ld	2,27	1600	0,45
	C4	2,8	579	29,6	18944	14100	0,25	34	30,9	6,7	<ld	23,1	1100	324
	C5	5,3	353	6,9	4429	480	0,14	1,55	0,11	6,84	<ld	0,14	70	7,74
	C6	4,2	446	2,8	1766	370	2,33	1,97	0,06	2,52	<ld	1,02	14	36,8
	C7	2,9	464	23,4	14976	11150	4,7	27	5,44	3,62	<ld	16,4	700	37,5
	C8	6,3	333	8,9	5747	780	0,1	0,68	0,15	1,74	<ld	0,17	80	0,249

Tabla 9.5. Características de las aguas y contenido en elementos traza de la zona C

		Li ⁺ mg/l	Na ⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	Ca ²⁺ mg/l	Mg ²⁺ mg/l	F ⁻ mg/l	Cl ⁻ mg/l	NO ₂ ⁻ mg/l	Br ⁻ mg/l	NO ₃ ⁻ mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l	CO ₃ ²⁻ mg/l
Cont. 1ª	C1	2	5	386	735	1250	10	84		33	46	23650	
	C2	0,1	153	32	627	735	0,5	141	1	0,3	1	2228	1005
	C3		41	3175	896	7666	25	338		61	46	62904	
	C4	7	0,1	2516	867	9104	42	166		64	9	62537	
	C5	1	182	145	658	1671	2	197		9	11	8241	
	C6	0,1	8	23	319	185	1	20		2	16	2192	
	C7	4	12	1603	857	5929	21	119	2	36	36	40448	
	C8	1	168	159	594	2559	1	230	1	12	23	12232	

Tabla 9.6. Contenido en iones solubles en la zona C

9.4. Zona D- El Gorguel.

9.4.1. Contaminación primaria.

Todas las aguas recogidas en el Gorguel tienen valores de pH ácidos, junto con elevadas concentraciones de elementos traza, fundamentalmente cinc, cadmio, arsénico y aluminio. Como en el caso de los sedimentos, existen diferencias entre las aguas recogidas en la parte alta y baja de la Rambla, ya que están influidas por diferentes balsas.

Así, las recogidas en la parte baja (D2-D7) presentan mayor concentración de arsénico y aluminio, mientras que el contenido soluble de cinc es mayor en la

parte alta (D8-D13) (Tabla 9.7). Todas tienen en común elevada concentración de sulfatos y en la parte alta también es elevada la concentración de cloruros (Tabla 9.8).

Los resultados obtenidos con MINTEQ muestran que los elementos traza solubles pueden precipitar formando óxidos de hierro y aluminio y sulfatos, jarositas fundamentalmente, aunque también anglesita en la muestra D8, yeso en la D9, D11 y D12 (Anexo I).

Finalmente, se seleccionó una muestra de cada grupo, a la que se dejó evaporar el agua y estudiar la formación de sales, concretamente las aguas D4 y D11. En la D4 (Figura 9.3) se formaron copiapita, coquimbita, yeso, bianchita y ferrohexahidrita y en la D11 se formó yeso, bianchita, halotrichita y siderotilo (Anexo I).



Figura 9.3. Muestras de agua recogidas en la zona del Gorguel

9.4.2. Contaminación secundaria.

En esta categoría únicamente se recogió agua en el punto D1, y se caracteriza por presentar un pH superior a las anteriores, menor contenido en elementos traza y sales solubles (Tablas 9.7 y 9.8).

La evaporación del agua, y el análisis por Difracción de Rayos X del residuo muestra la formación de halita, hexahidrita y yeso.

Finalmente, el modelo MINTEQ muestra la precipitación del aluminio como diásporo y gibbsita así como la formación de alunita (Anexo I).

		pH	Eh mV	CE dS/m	TDS mg/l	Zn mg/l	Pb mg/l	Cd mg/l	Fe mg/l	As µg/l	Hg µg/l	Cu mg/l	Mn mg/l	Al mg/l
Cont. 1ª	D2	2,7	591	2,19	1402	44	0,1	1	98,5	<ld	<ld	12,9	25	63,2
	D3	1,9	523	12,62	8077	430	0,63	16	1860	15319,8	<ld	76	270	1140
	D4	2,6	616	3,12	1997	1020	0,058	2,2	975	457,72	<ld	19,6	160	170
	D5	2,1	517	11,19	7162	207	0,58	2,17	3810	1191,86	<ld	34	200	1560
	D6	2,7	600	1,72	1101	33	0,093	1	31,5	0,53	<ld	3,12	15	60,1
	D7	5,3	398	2,66	1702	210	0,79	2,25	<ld	2,58	<ld	0,027	72,5	1,34
	D8	2,4	498	15,59	9978	6450	3,6	42	268	3,98	<ld	3,41	1110	1,78
	D9	4,0	405	5,71	3654	200	1,23	1,1	0,48	4,36	<ld	0,053	75	71,6
	D10	3,1	362	28,5	18240	540	2,26	25	5,31	5,01	<ld	0,25	357	69,9
	D11	4,3	365	7,95	5088	618	2,62	2,6	130,5	4,38	<ld	0,038	170	4,87
	D12	1,7	476	43,8	28032	7750	2,22	55	26150	15881,6	<ld	19	3110	1093
	D13	3,3	479	28,3	18112	9400	0,89	41	1240	8133,2	<ld	10	1880	1400
Cont. 2ª	D1	4,8	434	2,12	1357	180	0,87	0,43	<ld	3,72	<ld	0,012	12	2,4

Tabla 9.7. Características de las aguas y contenido en elementos traza de la zona D

		Li ⁺ mg/l	Na ⁺ mg/l	NH ₄ ⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	Ca ²⁺ mg/l	Mg ²⁺ mg/l	F ⁻ mg/l	Cl ⁻ mg/l	NO ₂ ⁻ mg/l	Br ⁻ mg/l	NO ₃ ⁻ mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l
Cont. 1ª	D2		6		28	239	32	1	24		2	11	2006
	D3	1	5		206	179	241	1	21		2	12	2345
	D4	0,4	3		146	309	129	1	17		4	4	3353
	D5	0,2	2		98	71	129	1	12		4	4	2989
	D6	0,1	3		46	239	45		11		2	7	1897
	D7	0,2	69	2	125	452	229	1	127		2	18	2016
	D8	0,4	25		445	156	635	12	114		10	21	9140
	D9	1	570		223	773	978	3	1032	3	2	9	6217
	D10		365		175		1513		622		4	136	2707
	D11		285		371	671	1288	0,3	264	3	1	8	5759
	D12		277			917	139	0,4	271	3	1	10	5421
	D13		45		199	222	50	1	23			20	1151
Cont. 2ª	D1		215		27	503	76	0,2	366	1	2	5	1392

Tabla 9.8. Contenido en iones solubles en la zona D

9.5. Zona E- Portman.

9.5.1. Contaminación primaria.

El agua del punto E11 se corresponde con una zona de vertido directo, en el que la concentración de elementos traza es elevada, destacar el caso del arsénico, así como los sulfatos y cloruros (Tablas 9.9 y 9.10). Es un agua tanto influida por la oxidación de la pirita (sulfatos) como por la influencia del mar (cloruros).

La especiación con MINTEQ muestra que los elementos solubles pueden precipitar como óxidos e oxihidróxidos de hierro y aluminio y como sulfatos (alunita y jarosita).

9.5.2. Contaminación terciaria.

Las aguas E9 y E10 han sido recogidas en la Rambla de Portman, en puntos en los que los materiales procedentes de balsas situadas en la zona minera se han mezclado con las filitas y carbonatos de la zona circundante, por lo que la contaminación se ha atenuado.

La concentración de elementos traza solubles es escasa (Tabla 9.9), ya que parte de los mismos precipita formando carbonatos, como muestra el modelo MINTEQ (cincita, smithsonita, otavita, vaterita, magnesita, huntita y rodocrosita) (Anexo I).

9.5.3. No influidas por la actividad minera.

Finalmente, las aguas recogidas en los puntos de muestreo E4 y E12 no muestran influencia de las balsas de estériles de la zona minera, por lo que los contenidos en elementos solubles pueden proceder de las zonas de suelos rojos existentes, con valores de fondo elevados (Tablas 9.9 y 9.10).

El modelo MINTEQ en ambas muestra la precipitación de los elementos solubles en forma de carbonatos (Anexo I).

		pH	Eh mV	CE dS/m	TDS mg/l	Zn mg/l	Pb mg/l	Cd mg/l	Fe mg/l	As µg/l	Hg µg/l	Cu mg/l	Mn mg/l	Al mg/l
Cont. 1ª	E11	8,33	70	48,1	30784	0,39	0,83	0,5	7,2	9,66	<ld	0,21	0,7	0,231
Cont. 3ª	E9	6,58	389	0,466	298	12,5	0,62	0,3	1	<ld	<ld	0,05	1,2	0,184
	E10	7,36	236	0,782	500	15	0,78	0,3	1,55	<ld	<ld	0,06	0,9	0,188
No infl.	E4	7,71	144	9,43	6035	0,08	<ld	3	<ld	1,28	<ld	<ld	0,5	0,222
	E12	7,76	301	11,62	7437	0,13	<ld	0,002	0,12	<ld	<ld	<ld	<ld	0,261

Tabla 9.9. Características de las aguas y contenido en elementos traza de la zona E

		Na ⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	Ca ²⁺ mg/l	Mg ²⁺ mg/l	F ⁻ mg/l	Cl ⁻ mg/l	NO ₂ ⁻ mg/l	Br ⁻ mg/l	NO ₃ ⁻ mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l	CO ₃ ²⁻ mg/l
Cont. 1ª	E11	15389	423	446	4716	6	13799	15	59	15	33444	65
Cont. 3ª	E9	35	5	280	43	0,1	45	1	0,1	11	234	336
	E10	25	123	390	66	0,1	50	0,5	0,1	11	286	295
No infl.	E4	1649		560	726	0,2	3266	3	<ld	31	1962	767
	E12	2234		646	792	0,2	4124	3	17	19	1924	1122

Tabla 9.10. Contenido en iones solubles en la zona E

9.6. Análisis estadístico.

La Tabla 9.11 muestra la matriz de correlaciones entre la concentración de elementos traza solubles, el pH, la conductividad eléctrica y los aniones de las aguas muestreadas.

Los resultados ponen de manifiesto que todos los elementos traza estudiados están negativamente correlacionados con el pH, de manera que las muestras con pH más bajo son las que presentan más concentración de elementos traza solubles.

Además, existe una correlación positiva entre la conductividad eléctrica de la muestra y el contenido de cinc, cadmio, hierro, arsénico y manganeso del agua.

En cuanto a las correlaciones entre los elementos traza y los aniones, destaca la correlación positiva de cinc, cadmio y manganeso con los sulfatos, a los que parecen estar ligados.

	pH	CE	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Al	F	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
pH																
CE	-0,06															
Zn	-0,38	0,47**														
Pb	-0,43**	0,17	0,44**													
Cd	-0,43**	0,52*	0,92*	0,46**												
Fe	-0,34	0,39	0,16	0,06	0,33											
As	-0,43**	0,32	0,13	-0,04	0,29	0,72*										
Cu	-0,53*	0,16	0,19	-0,04	0,24	0,28	0,66*									
Mn	-0,42**	0,60*	0,71*	0,29	0,80*	0,57*	0,44	0,21								
Al	-0,35	0,12	0,02	-0,12	0,04	0,35	0,62*	0,32	0,10							
F	-0,34	0,35	0,69*	0,50**	0,52*	-0,07	-0,06	0,14	0,39	0,07						
Cl ⁻	0,53*	0,55*	-0,18	-0,18	-0,18	-0,09	-0,13	-0,18	-0,17	-0,12	-0,12					
NO ₂ ⁻	0,41**	0,59*	-0,14	-0,08	-0,13	0,05	-0,05	-0,15	-0,11	-0,10	-0,10	0,87*				
Br ⁻	0,13	0,68*	0,45	0,10	0,25	-0,08	-0,07	0,03	0,17	0,09	0,57*	0,67*	0,55*			
NO ₃ ⁻	0,24	0,07	-0,07	-0,07	-0,04	-0,09	-0,10	-0,17	0,05	-0,04	0,04	0,12	-0,03	0,10		
SO ₄ ²⁻	-0,23	0,55*	0,77*	0,36	0,58*	-0,03	-0,04	0,12	0,49**	0,10	0,872*	0,05	0,11	0,74*	0,04	
CO ₃ ²⁻	0,57*	0,23	-0,21	-0,27	-0,21	-0,11	-0,15	-0,20	-0,23	-0,13	-0,21	0,69*	0,46**	0,41**	0,03	-0,17

Tabla 9.11: Análisis de correlaciones entre los metales solubles, el pH, la conductividad eléctrica y los aniones solubles

(**) p<0,05; (*) p<0,01

Se ha realizado un análisis de componentes principales con el fin de reducir el número de variables y comprobar la distribución de las muestras en función de las mismas. Se han obtenido tres factores que explican el 72% de la varianza (Tabla 9.12):

	F1	F2	F3
pH	-0,356	0,540	-0,574
EH	0,301	-0,618	0,416
CE	0,502	0,685	0,392
Zn	0,829	-0,040	0,258
Pb	0,479	-0,205	0,038
Cd	0,620	-0,037	0,513
Fe	-0,012	0,096	0,828
As	-0,049	0,022	0,937
Cu	0,122	-0,141	0,637
Mn	0,451	0,026	0,535
Al	0,000	-0,019	0,585
Litio	0,656	-0,121	0,068
Sodio	-0,001	0,904	-0,131
Potasio	0,819	0,022	-0,093
Calcio	0,499	0,412	0,091
Magnesio	0,891	0,209	-0,139
Fluoruros	0,902	-0,076	-0,046
Cloruros	-0,083	0,935	-0,153
Nitritos	-0,046	0,885	-0,041
Bromuros	0,548	0,701	-0,047
Nitratos	0,057	0,104	-0,210
Sulfatos	0,946	0,163	-0,017
Carbonatos	-0,251	0,699	-0,199
Varianza (%)	29	25	18

Tabla 9.12. Factores obtenidos tras el análisis de componentes principales del contenido en elementos traza solubles, aniones y cationes

La representación gráfica de los factores 1 y 2, definidos por los cationes el factor 1 y los aniones y el sodio el factor 2, muestra como se agrupan las aguas que mayor contenido en cationes presentan en el primer y cuarto cuadrantes: todas ellas fueron recogidas en puntos afectados por contaminación primaria y son las que muestran mayores concentraciones de cinc, cadmio y plomo solubles. Por otro lado, en el segundo cuadrante se agrupan los puntos con elevada influencia marina, A5 y E11 principalmente, y con menor influencia, A14, A10, A15 y A8.

Al representar gráficamente los factores 1 y 3, definidos por los cationes el factor 1 y los elementos traza el 3, las aguas del Gorguel (elevado contenido tanto en aniones como en elementos traza) aparecen en el segundo cuadrante. Las aguas con concentraciones elevadas de cinc, cadmio y plomo (recogidas en puntos afectados por contaminación primaria) lo hacen en el cuarto cuadrante.

Finalmente, al representar los factores 2 y 3 se observa que en la parte positiva del eje X, definido por la influencia marina, aparecen los puntos A5 y E11.

En el segundo cuadrante, aparecen las aguas del Gorguel, con elevado contenido en elementos traza (Fe, As, Cu, Mn y Al) y sin influencia marina (Figura 9.4).

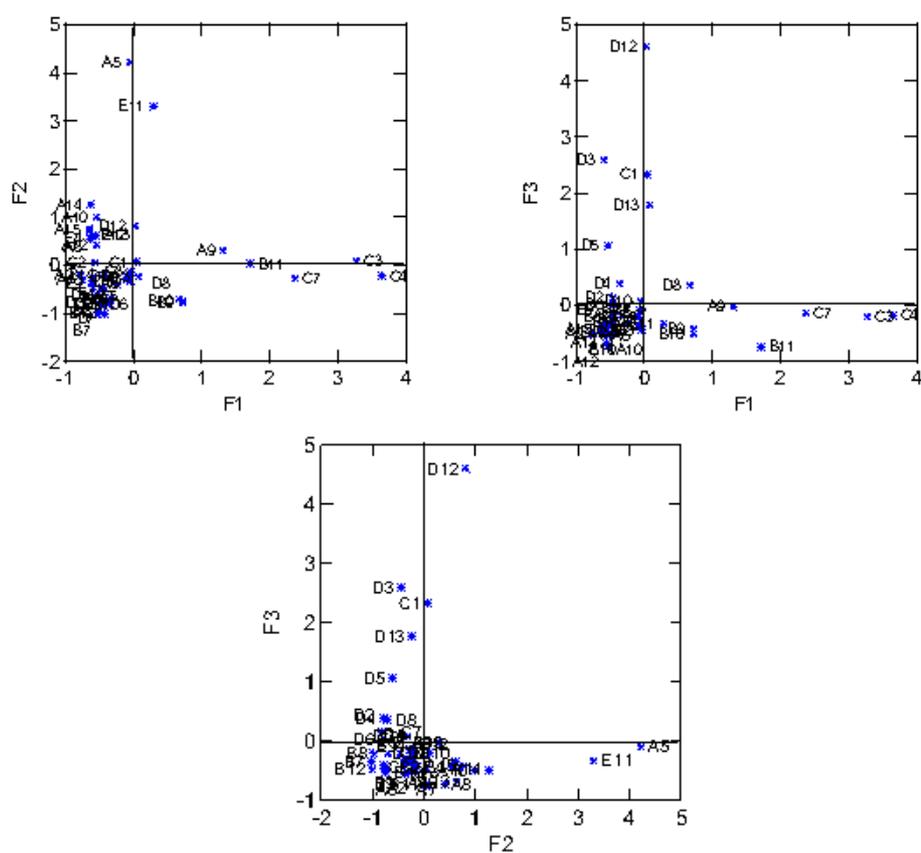


Figura 9.4. Representación gráfica de los factores obtenidos



**10. MOVILIDAD NATURAL Y MOVILIZACIÓN
POTENCIAL DE ELEMENTOS TRAZA**

10.1. Movilidad de elementos traza.

Como movilidad se entiende la velocidad con la que un contaminante se distribuye en un medio y viene determinada por la transferencia de una sustancia de un medio a otro (Cao et al., 2008). Regula la distribución del contaminante y por tanto, su transporte a otros sistemas.

El estudio de la movilidad relativa de los elementos traza en los suelos es de gran importancia para determinar la disponibilidad que pueden presentar a los organismos y por los problemas que se puedan ocasionar como consecuencia de su lixiviación a través del perfil del suelo hacia las aguas subterráneas o su arrastre en superficie (Alloway, 1997).

Los factores que influyen en la movilidad de elementos traza en el suelo son (Sauquillo et al., 2003):

- Características del suelo, como son el pH, potencial redox, composición iónica de la solución del suelo, capacidad de intercambio, presencia de CaCO_3 , materia orgánica, textura, etc.
- Origen de los elementos traza y forma de deposición.
- Condiciones medioambientales, como acidificación, cambios en las condiciones redox o variación de temperatura y humedad.

El pH afecta a la solubilidad y la disponibilidad de macro y micronutrientes, a la movilidad de elementos traza y la reactividad de minerales. La mayoría de los elementos traza aumentan su movilidad en el suelo al aumentar la acidez del medio, apareciendo en forma de especies iónicas o como órgano-metales solubles (Volke-Sepúlveda et al., 2005); sin embargo, si forman oxianiones como el arsénico, la movilidad decrece con el descenso de pH (Chopin et al., 2003).

El potencial redox junto con el pH es de gran importancia en la movilidad de los elementos traza en el suelo. Si las condiciones son oxidantes, tiene lugar la oxidación y disolución de sulfuros y precipitados insolubles, que aumenta la movilidad de muchos elementos traza al aumentar la acidez (Lottermosser, 2007). Si las condiciones son reductoras se puede producir la disolución de

oxihidróxidos y la liberación al medio de los elementos traza adsorbidos y precipitados sobre ellos (Alloway, 1995).

La composición de la solución del suelo puede afectar a los procesos de adsorción-desorción y complejación de los elementos traza, debido a la presencia de ligandos tanto inorgánicos como orgánicos que pueden complejarlos (Alloway, 1997; Naidu et al., 2001), interviniendo en la movilidad, biodisponibilidad y transporte de los elementos traza en el suelo (Stucki et al., 1995).

La capacidad de intercambio catiónico aumenta la capacidad de autodepuración de suelos y sedimentos, al fijar los contaminantes sobre la superficie de las partículas. Esta retención depende de las características propias de cada ión metálico, como el radio iónico y la valencia, aumentando la retención al reducirse el radio y aumentar la valencia.

El tipo de sustrato y la textura son factores determinantes en la fijación de los elementos traza, que además depende del contenido en arcillas, que tienden a retener los cationes. Por otro lado, el tamaño de partícula también tiene gran influencia, de manera que texturas finas implican un aumento de la superficie reactiva y por tanto aumenta la capacidad de adsorción.

La relación entre la materia orgánica y los elementos traza es importante en la disponibilidad de éstos, debido a su capacidad de formar complejos (Reichmann, 2002).

Los óxidos e hidróxidos de hierro, manganeso y aluminio se encuentran expuestos a la reducción, solubilización por complejación, procesos de oxidación o precipitación, en los que son de gran importancia los procesos microbiológicos.

Estos óxidos e hidróxidos poseen una alta capacidad de adsorción y muchos elementos traza pueden ser adsorbidos por ellos. Los mecanismos de adsorción implican, generalmente, la sustitución isomórfica de cationes divalentes o trivalentes por medio de reacciones de intercambio catiónico y efectos de oxidación en la superficie de los precipitados de los óxidos.

Los microorganismos están expuestos a la presencia de metales y metaloides en el medio, pudiendo interactuar con ellos. Entre las posibles interacciones organismos-elementos traza destacan (Volke-Sepúlveda et al., 2005):

A- Interacciones metabólicas-enzimáticas

- Captación de elementos traza para su incorporación a metalo-enzimas o su uso en la activación de enzimas.
- Utilización de elementos traza como donadores o aceptores de electrones en el metabolismo energético.
- Detoxificación enzimática de especies metálicas tóxicas.
- Biocorrosión enzimática anaerobia.

B- Interacciones metabólicas-no enzimáticas

- Acumulación de elementos traza a través de su unión, como cationes, a la superficie celular en un proceso pasivo.
- Biolixiviación selectiva o no selectiva de constituyentes metálicos de minerales junto con otros productos metabólicos.
- Excreción de productos metabólicos inorgánicos (carbonatos, fosfatos) durante el metabolismo respiratorio, produciéndose fenómenos de precipitación de los iones.

El clima es un factor que ejerce una enorme influencia, no sólo en la movilidad de los elementos traza en el suelo, sino también en el resto de factores antes mencionados (Seoánez Calvo, 1999).

Podemos hablar de una movilidad natural de los elementos traza en el suelo, consecuencia de la actividad biológica, de las interacciones sólido-líquido y de la acción del agua. Sin embargo, cuando el aumento de la solubilidad de los elementos traza tiene su origen en los cambios de las condiciones medioambientales, que inducen cambios en las especies o formas en que se encuentran los elementos traza, hablamos de una movilidad potencial.

10.2. Evaluación de la movilización de elementos traza en el suelo.

La distribución, movilidad, biodisponibilidad y toxicidad de los elementos traza no sólo depende de la concentración total de los mismos, sino también de la forma en la que aparecen (Figura 10.1).



Figura 10.1. Formas de los elementos traza potencialmente tóxicos en el suelo.

Modificado de De Vivo et al., 2008.

En sedimentos se pueden realizar dos tipos de determinaciones: la concentración total de elementos traza, que proporciona una evaluación del nivel de contaminación y, la especiación o estudio de las diferentes formas químicas en las que se encuentran los elementos traza, que nos proporciona información de la disponibilidad biológica en unas determinadas condiciones medioambientales.

Una de las primeras metodologías de extracción química secuencial fue desarrollada por Tessier et al., 1979, que ha servido de base para el desarrollo de otros esquemas posteriores de especiación.

En la mayoría de esquemas de especiación se pretende separar los elementos traza en cinco fracciones (López-Julián y Mandado-Collado, 2002):

- Fracción intercambiable (elementos traza adsorbidos en las partículas).

- Fracción carbonatada (elementos traza asociados a los carbonatos).
- Fracción ligada a óxidos de Fe y Mn.
- Fracción ligada a materia orgánica y sulfuros.
- Fracción residual (solamente disponible por erosión).

El empleo de extracciones simples es un método bastante rápido y sencillo, pero presenta dificultades a la hora de seleccionar reactivos verdaderamente efectivos en la extracción selectiva de los diferentes elementos. Las extracciones secuenciales, requieren más tiempo y suministran información sobre el estado de los elementos traza en suelos y sedimentos.

En suelos carbonatados, la aplicación de extracciones secuenciales para determinar la fracción a las que van ligadas los elementos traza, produce grandes errores de evaluación, ya que al tratarse de etapas en medio ácido, lo que sucede es que hay una especiación de las distintas formas de los elementos traza ligadas a carbonatos (Pérez-Sirvent et al., 1999).

10.2.1. Arsénico.

El arsénico es un elemento que forma parte de gran cantidad de sulfuros y sulfoarseniuros, principalmente arsenopirita (FeAsS), aunque también rejalgar (AsS) y oropimente (As_2S_3). Está relacionado con otros sulfuros como la galena, la piritita y la esfalerita. En los suelos aparece bajo los estados de oxidación +3 y +5, estando el estado de oxidación influido por el contenido en materia orgánica y por los óxidos de hierro y aluminio.

El arsénico ha sido usado para señalar la presencia de metales preciosos, ya que anomalías de arsénico son características de depósitos epitermales y mesotermales de oro.

Entre los factores que influyen en la movilidad de este elemento está el pH, la materia orgánica, el contenido en arcilla, el contenido en óxidos de hierro y aluminio y la capacidad de intercambio catiónico. Una variable importante es el contenido en hierro y manganeso, ya que el arsénico adsorbido a los óxidos de

estos elementos traza puede desorberse en condiciones reductoras (Moreno Grau, 2003).

En general, los compuestos y minerales de arsénico son relativamente solubles, pero su movilidad es limitada debido a la fuerte adsorción con los minerales de la arcilla, los hidróxidos y la materia orgánica. La mayor parte de las formas móviles de arsénico (AsO_2^- , AsO_4^{3-} , HAsO_4^{2-} , HAsO_3^-) son adsorbidas en valores de pH entre 7 y 9. En la mayoría de medios, el As^{+5} aparece como H_2AsO_4^- mientras que el As^{+3} en la forma H_3AsO_3 predomina en medios con bajos valores de pH.

El arsénico puede metilarse por acción de las bacterias y otros seres vivos, tanto en sedimentos como en aguas. Combinado con el hidrógeno forma arsenamina, AsH_3 , con un estado de oxidación -3, forma inorgánica volátil, muy tóxica al ser un potente agente hemolítico.

Las fuentes antropogénicas de arsénico incluyen la combustión del carbón, plantas de energía geotérmica, fundiciones de sulfuros y residuos procedentes de granjas de cerdos y aves. Otras fuentes de contaminación son herbicidas, insecticidas y fungicidas que contengan compuestos de arsénico (Kabata-Pendias, 2001).

La toxicidad de sus compuestos varía mucho, siendo el arseniato sódico y el trióxido de arsénico los compuestos más tóxicos, si bien, por lo general, los compuestos de As^{+5} presentan menor toxicidad que los de As^{+3} (Kelley et al., 2002).

El arsénico se diferencia de la mayoría de los elementos traza en que, en general, sus compuestos orgánicos son menos tóxicos que las formas inorgánicas.

Las principales vías de exposición al arsénico son la ingestión de alimentos o agua de bebida y la inhalación de partículas, estando el grado de absorción influido por la ruta de exposición y la forma química en que se encuentre. La excreción tiene lugar fundamentalmente a través de la orina, descamación de la piel y en menor medida a través del sudor. Una vez absorbido, presenta gran afinidad por los grupos sulfhidrilo, presentes en distintas moléculas celulares, con los que reacciona provocando la pérdida de funcionalidad ya que impide la respiración celular.

La exposición a dosis elevadas puede ser letal y sus efectos agudos consisten en fiebre, hepatomegalia, melanosis, arritmia cardiaca, neuropatía periférica, anemia y leucopenia. La exposición crónica a este elemento produce efectos adversos en la piel (queratosis, hiperpigmentación) así como sobre el sistema nervioso y el hígado.

Además, está clasificado en el grupo I de sustancias cancerígenas por la IARC (Internacional Agency for Research on Cancer), siendo los principales tipos de cáncer implicados los de piel, pulmón, hemangiosarcoma hepático, linfoma, leucemia y cánceres de vejiga urinaria, riñón y nasofaríngeo (Moreno Grau, 2003).

10.2.2. Cadmio.

El cadmio es un elemento poco abundante en la corteza terrestre, que aparece sustituyendo al mercurio, cobre, plomo y cinc en sulfuros, particularmente en la esfalerita (ZnS) y en menor grado en la smithsonita (ZnCO₃). También se ha encontrado cadmio a bajas concentraciones en minerales silicatados, como la biotita o los anfíboles. También puede formar minerales propios, como la greenockita (CdS), la otavita (CdCO₃) o la monteponita (CdO).

Las principales formas del metal en la solución del suelo son además de la iónica, Cd²⁺, complejos como CdCl⁺, CdOH⁺, CdHCO₃⁺, CdCl₃⁻, CdCl₄²⁻, Cd(OH)₃⁻, Cd(OH)₄²⁻ y complejos orgánicos (Kabata-Pendias, 2001).

La solubilidad del cadmio en agua aumenta en medios ácidos, mientras que la adsorción a suelos y sedimentos se incrementa al aumentar el pH (Moreno Grau, 2003).

Las aplicaciones más importantes de este metal, en forma de óxido, son la fabricación de baterías, como catalizador y para recubrimientos electrolíticos; en forma de sulfuro como pigmento amarillo y en forma de sulfato como intermediario en procesos químicos.

Las principales fuentes de contaminación de cadmio son la extracción de minerales de cinc y plomo, la deposición atmosférica procedente de actividades industriales, la deposición de residuos como los procedentes de la incineración de

plásticos, pilas, la aplicación de lodos de depuradora como enmendante, la quema de combustibles fósiles y el empleo de un gran número de materiales que contienen el metal como impureza, como es el caso de los fertilizantes fosfatados (Kabata-Pendias, 2001).

Los factores que controlan su movilidad son básicamente el pH y el potencial redox del suelo. A pesar de que puede presentar gran movilidad a lo largo del perfil del suelo, puede concentrarse en los horizontes superficiales por procesos de adsorción sobre la materia orgánica y debido a su incorporación al suelo en la aplicación de lodos de depuradora o por deposición seca procedente de la atmósfera.

El cadmio no tiene un papel esencial en la especie humana ni en las plantas, sin embargo, a pesar de que a las concentraciones en las que habitualmente se encuentra en el medio ambiente no presenta problemas de toxicidad, es importante tener en cuenta las fuentes de contaminación y su comportamiento cuando se acumula en los suelos, ya que en ese caso puede suponer un riesgo para la salud (Kabata-Pendias, 2001).

Las principales vías de exposición al cadmio son la ingestión y la inhalación, siendo la absorción más eficaz por vía inhalatoria, que se ve favorecida por deficiencias dietéticas de hierro y calcio (Kelley et al., 2002; Moreno Grau, 2003).

El cadmio absorbido en el organismo se distribuye ampliamente por el organismo, pero se acumula principalmente en el hígado y el riñón, aunque también se deposita en el páncreas, tiroides, pulmones, testículos y glándulas salivales. Su eliminación, ya sea por vía urinaria o fecal, es muy lenta, por lo que cabe considerar a este metal como un tóxico acumulativo.

Una vez alcanzado el torrente sanguíneo, el cadmio se transporta ligado a proteínas plasmáticas de alto peso molecular, como la albúmina, así como a los hematíes. Parte del transporte de cadmio en la sangre parece realizarse mediante formación de complejos con la metalotioneína, proteína de bajo peso molecular que interviene en el transporte y detoxificación de elementos traza, mediante la formación de complejos estables entre los iones metálicos y los grupos sulfhidrido de dicha proteína (Moreno Grau, 2003).

El cadmio tiene efectos tóxicos agudos y crónicos. Entre los agudos destacan la neumonitis y edema pulmonar. La exposición crónica a bajas concentraciones produce enfermedades obstructivas crónicas, degeneración de

los túbulos renales, hipertensión, alteraciones óseas (osteomalacia, osteoporosis y dolores óseos), efectos pulmonares (bronquitis, fibrosis, enfisema) y efectos renales (degeneración celular, alteración de los glomérulos, proteinuria) (Moreno Grau, 2003).

El cadmio está clasificado como agente cancerígeno del grupo I por la IARC.

10.2.3. Cinc.

Los minerales más abundantes son los sulfuros, esfalerita y wurtzita, ZnS , aunque también aparece en minerales como la smithsonita, $ZnCO_3$, hemimorfita, $ZnSi_2O_7(OH)_2$, cincita, ZnO , cincosita, $ZnSO_4$ y franklinita, $ZnFe_2O_4$. Además, está ampliamente distribuido como elemento traza en piroxenos, anfíboles, micas, granate y magnetita.

Su movilidad y disponibilidad dependen del pH del medio, siendo mucho más móvil en medio ácido; a elevados valores de pH forma complejos con los iones carbonato e hidróxido. La movilidad de este metal también está influida por el potencial redox del medio, siendo más móvil si las condiciones son oxidantes. Si las condiciones son reductoras precipita en forma de sulfuro, limitando su movilidad (Kabata-Pendias, 2001).

En suelos y aguas tiende a adsorberse a la materia orgánica, arcillas y a los óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso, aunque también forma complejos con la materia orgánica disuelta. La movilidad del cinc también aumenta en aguas salobres, debido a la competencia con otros cationes (como los alcalino-térreos) por los centros adsorbentes, interacciones que tienen como resultado la desorción del cinc.

El cinc posee importantes aplicaciones industriales: se utiliza como anticorrosivo en la fabricación de acero galvanizado, tuberías, tanques enterrados, buques, plataformas marinas y materiales de construcción. Además se utiliza en aleaciones, aplicaciones electrónicas y en la industria del caucho y pigmentos.

El cinc se absorbe en el organismo por vía gastrointestinal mediante procesos regulados, en los que intervienen transportadores específicos. Se

acumula en los músculos, hígado, riñón y tiroides, aunque también se han encontrado altas concentraciones en el sistema reproductor masculino, especialmente en la próstata. La excreción se produce básicamente por vía biliar, orina y en menor medida por el sudor (Moreno Grau, 2003).

El cinc es considerado como un elemento esencial que interviene en la regulación de numerosas síntesis, especialmente proteicas y en la constitución de metaloenzimas, desempeñando una importante función en el crecimiento. Además, previene patologías, modifica la estructura de proteínas, estabiliza la molécula de insulina, etc.

La toxicidad del cinc por ingesta excesiva es poco común, pero se ha observado que produce trastornos intestinales, náuseas, vómitos y dolor abdominal. En el ámbito industrial, la absorción de cinc y sus compuestos se produce por vía respiratoria mayoritariamente, caso de la manipulación del óxido de cinc, que provoca la llamada "fiebre de los metales o de los fundidores" presentando síntomas como fiebres altas, sudoración profusa, cefaleas, tos o sabor metálico en la boca.

El cinc se encuentra incluido en el grupo D, no clasificable, respecto a su actividad cancerígena por la Agencia de Protección del medio ambiente de los Estados Unidos (US EPA).

10.2.4. Cobre.

El cobre es un elemento esencial muy importante para los organismos, ampliamente distribuido en la naturaleza, en la que se encuentra formando parte de sulfuros, como la calcopirita (CuFeS_2) y covellina (CuS), sulfatos, carbonatos y otros compuestos e, incluso puede aparecer en ambientes reductores como cobre elemental. También puede aparecer ligado a micas, piroxenos y anfíboles como elemento traza.

Se emplea, generalmente en forma metálica, en la fabricación de equipamientos eléctricos, materiales de construcción, maquinaria industrial y aleaciones.

El cobre presente en el medio ambiente tiende a formar enlaces con los componentes sólidos de los suelos y sedimentos y su distribución en el suelo es

menos sensible que otros elementos traza a los cambios de pH, debido a que el aumento de solubilidad de algunas formas inorgánicas, como los hidróxidos, se ve contrarrestado por la formación de complejos insolubles (Moreno Grau, 2003).

Forma enlaces fuertes con la materia orgánica y tiende a adsorberse a las arcillas y a los óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso.

En el rango normal de pH en el suelo, las formas solubles más importantes en el medio son la iónica, Cu^{2+} , y el bicarbonato, $\text{Cu}(\text{HCO}_3)^+$. Puede llegar a formar complejos muy estables con los grupos carboxilo presentes en la materia orgánica, provocando incluso deficiencia del elemento para las plantas (Kabata-Pendias, 2001).

La principal causa de contaminación por cobre es la actividad agrícola, con el empleo de funguicidas, fertilizantes y aplicaciones de lodos de depuradora y residuos municipales.

La absorción de cobre se produce principalmente por vía gastrointestinal, y su transporte se produce asociado a proteínas como la albúmina. Se acumula principalmente en el hígado y la médula ósea y la excreción se produce fundamentalmente por vía biliar.

La exposición aguda por ingestión de sales solubles de cobre puede producir necrosis hepática y la exposición crónica se asocia a lesiones hepáticas en niños (Moreno Grau, 2003). No existen evidencias de efectos cancerígenos del cobre o sus compuestos por ninguna vía de exposición.

10.2.5. Hierro.

El hierro es el cuarto elemento más abundante en la corteza terrestre después del silicio, el oxígeno y el aluminio, y en el suelo se encuentra formando parte de minerales como la pirita FeS_2 , la siderita FeCO_3 , hematites Fe_2O_3 , magnetita Fe_3O_4 y goethita FeOOH . También puede aparecer en forma de silicatos ferromagnésicos o de otras estructuras cristalinas como piroxenos, anfíboles y micas.

El comportamiento del hierro en el suelo depende del sistema Eh-pH. En general, si las condiciones son oxidantes y el pH básico, se favorece la

precipitación de este elemento, mientras que si las condiciones son ácidas se favorece que aparezca en disolución (Kabata-Pendias, 2001).

En el suelo aparece generalmente en forma de óxido e hidróxido, aunque también puede formar quelatos, si el contenido en materia orgánica es elevado.

El contenido en hierro soluble es muy bajo en comparación con el contenido total, siendo mínimo a pH alcalino. Entre las formas inorgánicas solubles se incluyen Fe^{3+} , $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$, $\text{Fe}(\text{OH})_2^{2+}$, Fe^{2+} , $\text{Fe}(\text{OH})_3^-$ y $\text{Fe}(\text{OH})_4^{2-}$, que aparecen en mayor medida en suelos en los que el pH es ácido.

El principal uso del hierro es la obtención de aceros estructurales aunque también se producen grandes cantidades de hierro fundido y hierro forjado. Otros usos del hierro y de sus compuestos son la fabricación de imanes, tintes y abrasivos.

Es un elemento esencial en la nutrición humana, que se encuentra en una serie de proteínas de importancia biológica, entre ellas hemoglobina y citocromos, y también en muchos enzimas de oxidación-reducción.

Una vez que el hierro ha penetrado en el organismo, se absorbe a través de la mucosa duodenal y yeyunal. Dentro de las células epiteliales del intestino se oxida a hierro férrico y se une a la ferritina. Posteriormente se libera lentamente hacia el plasma, donde se une a la transferrina, una globulina específica para transportar hierro. Cuando esta proteína se satura, el exceso de hierro pasa a la sangre en forma libre.

La toxicidad del hierro es debida, por un lado a un efecto cáustico directo sobre la mucosa gastrointestinal, y por otro, a un efecto tóxico de las moléculas de hierro libre sobre el tracto gastrointestinal, sobre el sistema cardiovascular, sobre el hígado y sobre el sistema nervioso central.

La toxicidad sobre el tracto gastrointestinal, está relacionada con el efecto corrosivo directo. En el sistema cardiovascular se produce hipovolemia. La intoxicación por hierro también produce trastornos metabólicos como acidosis por la liberación de protones al oxidarse el hierro ferroso a férrico y la hiperglucemia que el hierro provoca en las primeras fases de la intoxicación, debido a que dificulta la entrada de glucosa en las células.

El hígado puede afectarse en caso de intoxicación grave, pudiendo oscilar la lesión entre una ligera inflamación y una necrosis masiva. En casos de lesión importante se produce fallo hepático, manifestaciones neurológicas,

hipoglucemia y hemorragias. Sobre el sistema nervioso central el efecto de la toxicidad por hierro es escaso (Moreno Grau, 2003).

10.2.6. Manganeseo.

El manganeseo en el medio ambiente generalmente forma parte de minerales, en los que aparece como Mn^{2+} , Mn^{3+} o Mn^{4+} , siendo el divalente el estado en el que aparece en los minerales silicatados. Durante los procesos de alteración, los compuestos de manganeseo se oxidan liberando óxidos de manganeseo que pueden precipitar formando minerales secundarios (Kabata-Pendias, 2001).

La solubilidad del manganeseo en el suelo está determinada por el pH y por las condiciones redox, siendo las reacciones más importantes a las que se ve sometido las de oxidación-reducción e hidrólisis.

Entre las principales fuentes antrópicas de manganeseo destaca la industria del acero, las plantas de energía y el polvo generado por operaciones de minería no controladas. También se ha empleado en plaguicidas.

La principal vía de exposición es a través de la ingesta y por vía inhalatoria y generalmente se acumula en el hígado, los riñones y en glándulas endocrinas.

La intoxicación aguda no produce un cuadro característico, aunque se produce una irritación de las membranas mucosas. La intoxicación crónica por manganeseo produce efectos sobre el sistema nervioso central y el aparato respiratorio. Uno de los cuadros típicos de intoxicación es el manganismo, que se da sobre todo en obreros que manipulan este metal, manifestándose como alteraciones mentales, astenia, anemia no específica y paresia (Moreno Grau, 2003).

10.2.7. Mercurio.

El principal mineral de mercurio es el cinabrio (HgS), aunque también puede aparecer como mercurio nativo o como elemento traza en sulfuros como la esfalerita. Presenta tres posibles estados de oxidación, 0, +1 y +2 y puede además formar parte de compuestos orgánicos, entre los que destaca el metilmercurio.

Fue empleado en la fabricación de termómetros y barómetros y entre sus usos actuales destaca la fabricación de bombas de difusión, plaguicidas, fungicidas, preparaciones dentales, pinturas anti-incrustaciones, baterías y catalizadores.

En cuanto a su movilidad, la elevada concentración de iones cloruro en el suelo puede disminuir la adsorción del mercurio por parte de los minerales del suelo o la materia orgánica, ya que se forman complejos estables Hg-Cl. La adsorción de mercurio por las arcillas también es limitada y varía con el pH.

Además, la movilidad del mercurio está influida por procesos de solubilización, y procesos de degradación biológica y química (Kabata-Pendias, 2001).

En medios ácidos, el mercurio se une a la materia orgánica, pudiendo migrar del suelo unido a esta fracción, mientras que en suelos neutros o alcalinos, el lavado de este metal en el suelo se produce unido a la fracción inorgánica activa.

La cantidad de mercurio movilizado disminuye cuando el $\text{pH} < 3$ o $\text{pH} > 12$.

El mercurio elemental se absorbe mal por ingestión pero muy eficazmente por inhalación, alcanzando el torrente sanguíneo donde atraviesa fácilmente las membranas debido a su carácter lipofílico.

El uso del mercurio monovalente es escaso por lo que no es relevante ambientalmente. El mercurio divalente no se absorbe fácilmente por vía gastrointestinal, al contrario que el metilmercurio. Una vez absorbidos, se distribuyen desigualmente en el organismo. El mercurio elemental alcanza su máxima concentración en los riñones y en el sistema nervioso central, el metilmercurio lo hace en la corteza cerebral y el mercurio inorgánico en los riñones.

En los tejidos, el mercurio elemental es oxidado a divalente y en esta forma reacciona con los sistemas enzimáticos de las mitocondrias y microsomas, especialmente con aquellos que contienen grupos sulfhidrilo, con los que presenta gran afinidad.

La intoxicación aguda puede provocar bronquitis corrosiva y neumonitis aguda. La intoxicación crónica produce efectos neurológicos y sobre el sistema nervioso central (Moreno Grau, 2003).

10.2.8. Plomo.

El plomo es un elemento muy distribuido en la naturaleza, no esencial y tóxico para los organismos. Forma parte de numerosos minerales, como la galena (PbS), la cerusita (PbCO₃) y la anglesita (PbSO₄).

Actualmente se emplea en la fabricación de baterías de automóviles y pilas, en la fabricación de munición, como material de soldadura, cables y en las pinturas se utiliza como pigmento. Además muchos compuestos orgánicos de plomo han sido ampliamente usados como aditivos de combustibles.

Las principales fuentes de contaminación de plomo son las actividades de minería y fundición, concentrándolo en los horizontes superficiales en forma mineral, el estiércol, los lodos de depuradora y algunos fitosanitarios utilizados en la agricultura, las pinturas empleadas en casas y jardines, y los humos procedentes de los tubos de escape de los automóviles.

El plomo se acumula en los horizontes superficiales del suelo donde se asocia a los minerales de la arcilla, a los óxidos de manganeso, a los hidróxidos de hierro y aluminio y a la materia orgánica. Se puede concentrar en carbonatos y fosfatos, formando compuestos insolubles y formar complejos muy estables con la materia orgánica.

Las principales vías de exposición al plomo son la ingestión y la inhalación y una vez que alcanza el torrente sanguíneo se distribuye desigualmente por el cuerpo, pero es en los huesos donde se alcanzan las mayores concentraciones y donde su retención y movilización se produce por los mismos mecanismos que regulan al calcio. Además de los huesos, otros órganos en los que se acumula son el hígado, los riñones y el sistema nervioso central.

La intoxicación aguda por plomo no es frecuente y los síntomas que produce son sequedad de la boca, gusto metálico, dolores abdominales, vómitos, efectos en el sistema nervioso central y problemas renales. La intoxicación crónica produce efectos gastrointestinales (anorexia, dolor abdominal), neuromusculares (debilidad, parálisis en manos y pies), sobre el sistema nervioso central (encefalopatía, mareos, ataxia, coma), efectos hematológicos (anemia), efectos renales y esterilidad (Moreno Grau, 2003).

El plomo y sus compuestos están clasificados por la IARC en el grupo 2B de agentes cancerígenos.

10.3. Movilidad natural de elementos traza en los materiales estudiados.

10.3.1. Extracción en agua.

10.3.1.1. Movilidad de elementos traza en agua.

Para el estudio de la movilidad natural se han analizado los sedimentos recogidos en las 5 zonas establecidas, obteniéndose los extractos suelo: agua (1:5), en los que se ha medido la concentración de elementos traza.

Los valores medios nos muestran que, en los extractos solubles, las menores concentraciones se dan para el arsénico, con un valor medio de 0,02 mg kg⁻¹, seguido de cadmio, cobre y plomo con valores medios de 3,2, 4,9 y 8,6 mg kg⁻¹ respectivamente. El manganeso presenta valores de concentración intermedios 98,8 mg kg⁻¹, siendo los metales más abundantes el hierro (121,1 mg kg⁻¹) y el cinc (622 mg kg⁻¹) (Tablas 10.1 a 10.5). El mercurio en todas las muestras consideradas está por debajo del límite de detección.

ZONA A	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn
	mg/kg						
Máximo	5,0	6,9	1,1	8,1	0,07	1,1	11,1
Media	1,4	1,9	0,3	1,5	0,02	0,3	1,7
Mínimo	0,1	0,01	0,002	0,05	0,001	0,01	0,05
Desv Est	1,8	2,6	0,4	2,3	0,03	0,4	3,3

Tabla 10.1. Concentración de elementos traza tras la extracción en agua (Zona A)

ZONA B	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn
	mg/kg						
Máximo	3575,0	9,9	12,2	5,4	0,07	2,3	1970,0
Media	269,1	2,1	1,1	1,1	0,01	0,7	151,6
Mínimo	0,1	0,003	0,001	0,05	0,001	0,005	0,05
Desv Est	844,6	2,8	2,6	1,2	0,002	0,8	442,6

Tabla 10.2. Concentración de elementos traza tras la extracción en agua (Zona B)

ZONA C	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn
	mg/kg						
Máximo	9932,0	43,1	24,2	63,6	0,1	6,2	266,0
Media	2408,3	10,8	9,9	13,5	0,02	2,2	124,1
Mínimo	2,0	0,6	0,01	1,1	0,002	0,06	8,2
Desv Est	3627,8	14,9	10,5	24,6	0,04	2,8	107,9

Tabla 10.3. Concentración de elementos traza tras la extracción en agua (Zona C)

ZONA D	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn
	mg/kg						
Máximo	1039,0	135,1	7,6	5030,1	0,08	115,5	580,0
Media	430,7	25,6	3,7	588,4	0,03	21,4	209,8
Mínimo	0,1	0,2	0,01	0,05	0,0001	0,02	0,05
Desv Est	416,3	41,1	2,8	1402,7	0,03	36,9	205,7

Tabla 10.4. Concentración de elementos traza tras la extracción en agua (Zona D)

ZONA E	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn
	mg/kg						
Máximo	2,0	4,3	1,0	1,7	0,1	0,9	19,0
Media	0,5	1,6	0,3	0,8	0,01	0,2	3,4
Mínimo	0,1	0,05	0,001	0,1	0,001	0,01	0,1
Desv Est	0,6	1,7	0,3	0,6	0,02	0,3	5,7

Tabla 10.5. Concentración de elementos traza tras la extracción en agua (Zona E)

Para evaluar la disponibilidad del metal en los materiales estudiados se han calculado los porcentajes de extracción en agua:

$$\text{Concentración extraída elemento (mg kg}^{-1}\text{) / Concentración total (mg kg}^{-1}\text{) x 100}$$

La Tabla 10.6 recoge los valores máximos, mínimos, medios y la desviación estándar de la fracción soluble para los elementos estudiados. Como podemos observar, hierro, arsénico y plomo prácticamente no se movilizan, ya que los porcentajes de extracción medios no alcanzan el 0,4%. El cobre es ligeramente más móvil (1,7%) que los tres anteriores. Con porcentajes mucho más elevados se encuentran cinc, cadmio y manganeso, con valores medios del 4,7%, 6,5% y 6,6% respectivamente.

	Zn (%)	Pb (%)	Cd (%)	Fe (%)	As (%)	Cu (%)	Mn (%)
Máximo	48	4,7	43,8	1,8	0,1	33,5	76,2
Media	4,7	0,3	6,5	0,06	0,004	1,7	6,6
Mínimo	-	0,0001	-	-	0,00001	0,001	-
Desv. Est	10,1	0,7	9,8	0,3	0,01	4,8	14,5

Tabla 10.6. Fracción soluble (%) de elementos traza tras la extracción en agua

Los porcentajes de extracción de cinc en las distintas zonas están recogidos en la Figura 10.2. En las zonas A y E, Lo Poyo y Portman, es muy escasa la movilización de cinc y no supera el 0,1% en ninguno de los sedimentos.

En la zona del Llano del Beal, los porcentajes más elevados se dan en los sedimentos B1 y B7, con un 40 y 20% de extracción, respectivamente. Coinciden con sedimentos afectados por contaminación primaria y en los que parte del cinc presente va ligado a sales solubles, fundamentalmente sulfatos.

En el Cabezo Rajao, la movilización de cinc es importante sobre todo en los sedimentos de los puntos C3, C4 y C7, alcanzando valores de hasta el 40%, por lo que como en el caso de la zona B, una parte del cinc va ligado a sales solubles.

Los porcentajes de extracción más altos se dan en la zona del Gorguel (D), donde se alcanzan valores cercanos al 50% en algunos puntos de muestreo. Además, y dentro de la zona, los porcentajes de extracción más altos se dan en la parte baja de la Rambla (D3, D4, D5) (Figura 10.2).

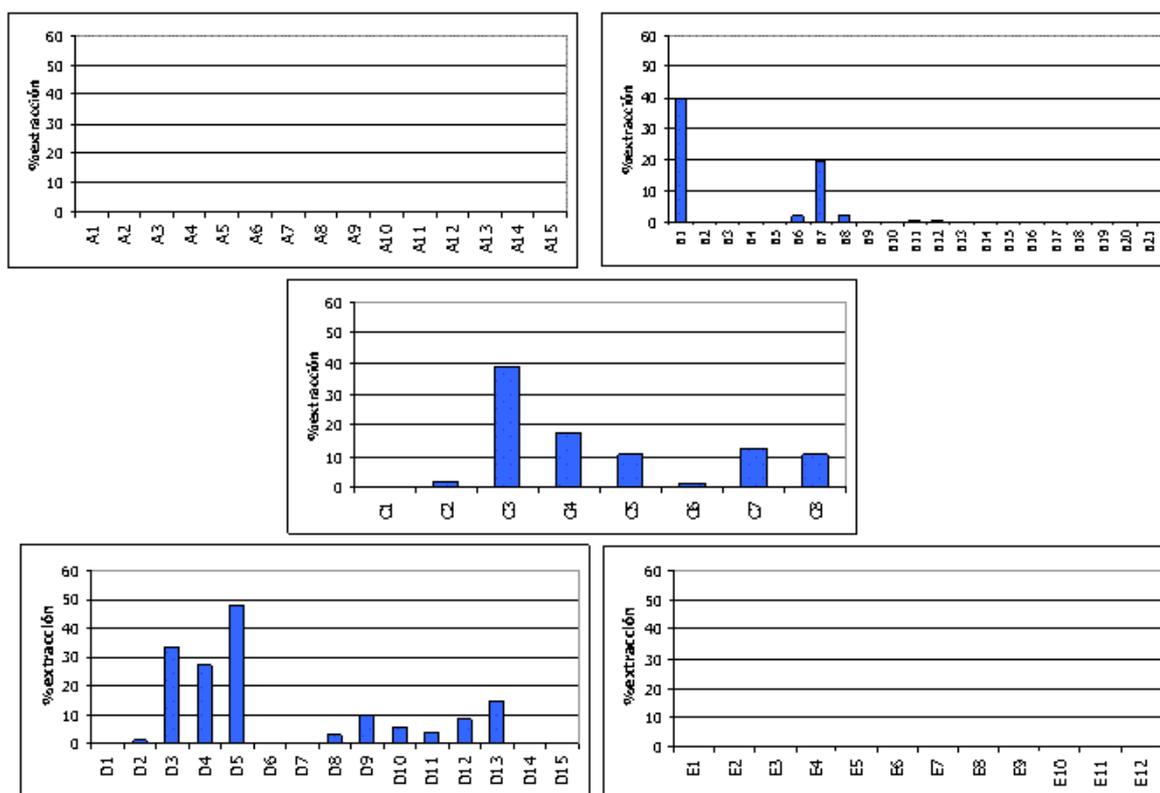


Figura 10.2. Porcentajes de extracción de cinc en agua

Como ya se ha comentado, el porcentaje de plomo extraído es bajo en todas las zonas, con un porcentaje medio menor al 2% en todos los sedimentos de las zonas A, B y C. En las zonas D y E, los porcentajes son ligeramente superiores, pero en ningún caso superan el 5% (Figura 10.3). La movilización de plomo es escasa en este medio, por lo que es poca la cantidad relacionada con fases solubles.

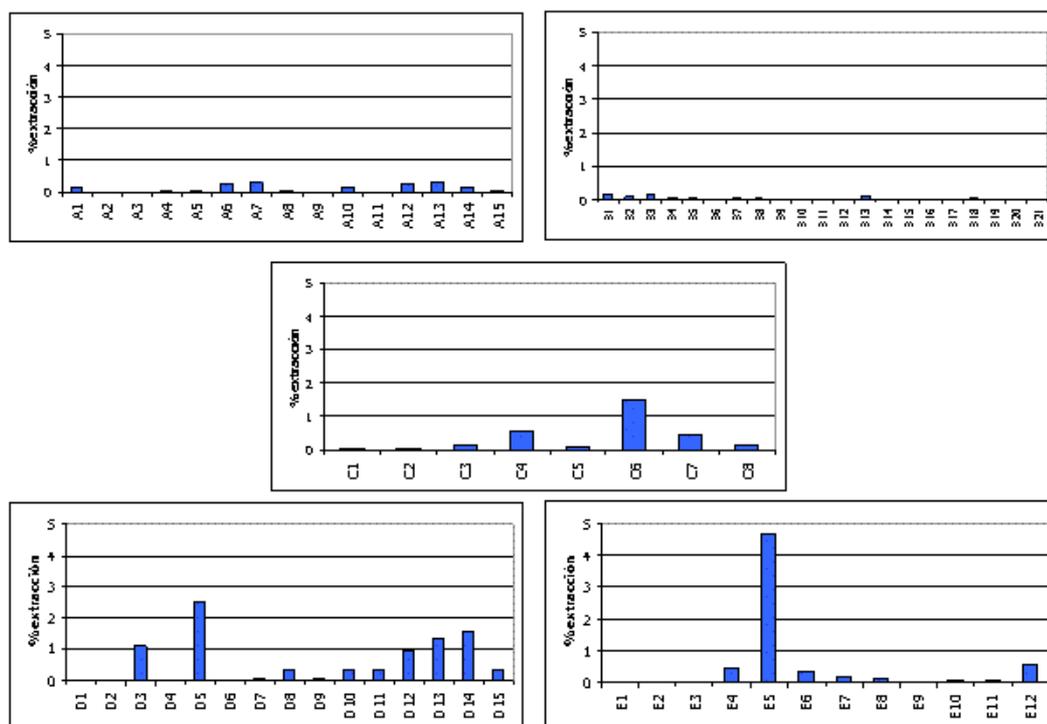


Figura 10.3. Porcentajes de extracción de plomo en agua

El porcentaje de cadmio extraído en agua es elevado en los sedimentos del Cabezo Rajao y el Gorguel, alcanzando valores del 40% en algunos puntos. En estos sedimentos la concentración de sales solubles, sulfatos fundamentalmente, es elevada, por lo que este metal puede ir ligado a estas sales en ambas zonas. En las otras tres zonas, ninguno de los sedimentos supera el 10% de extracción (Figura 10.4).

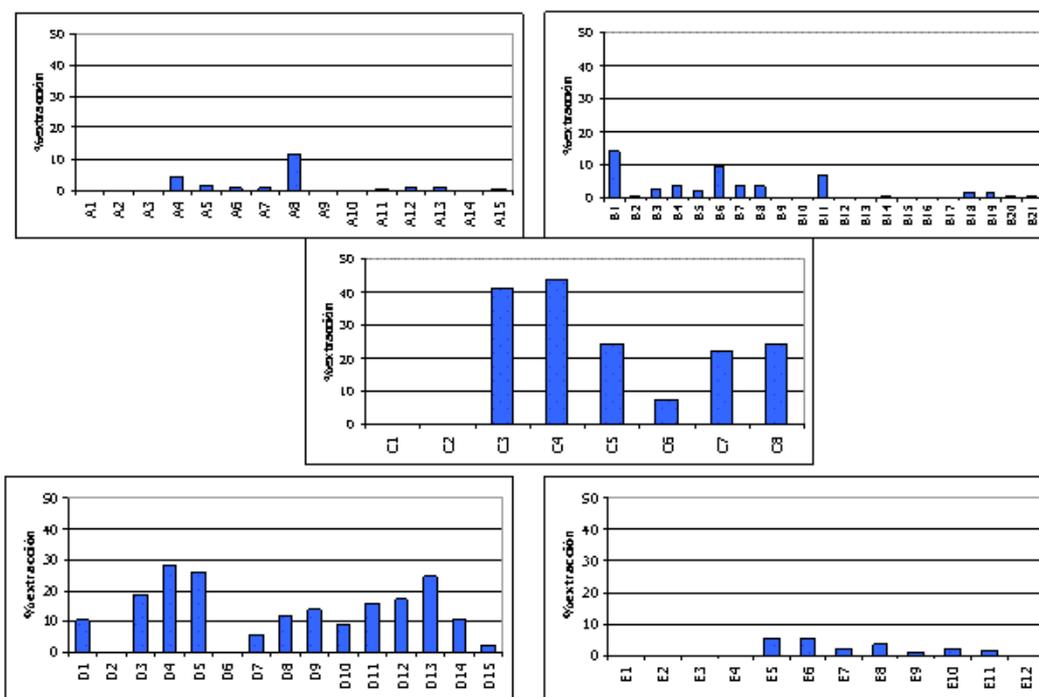


Figura 10.4. Porcentajes de extracción de cadmio en agua

La movilidad del hierro y el arsénico en agua es muy escasa, a excepción de los sedimentos D3, D5 y D12, en los que pueden encontrarse estos elementos en forma soluble (Figura 10.5 y 10.6).

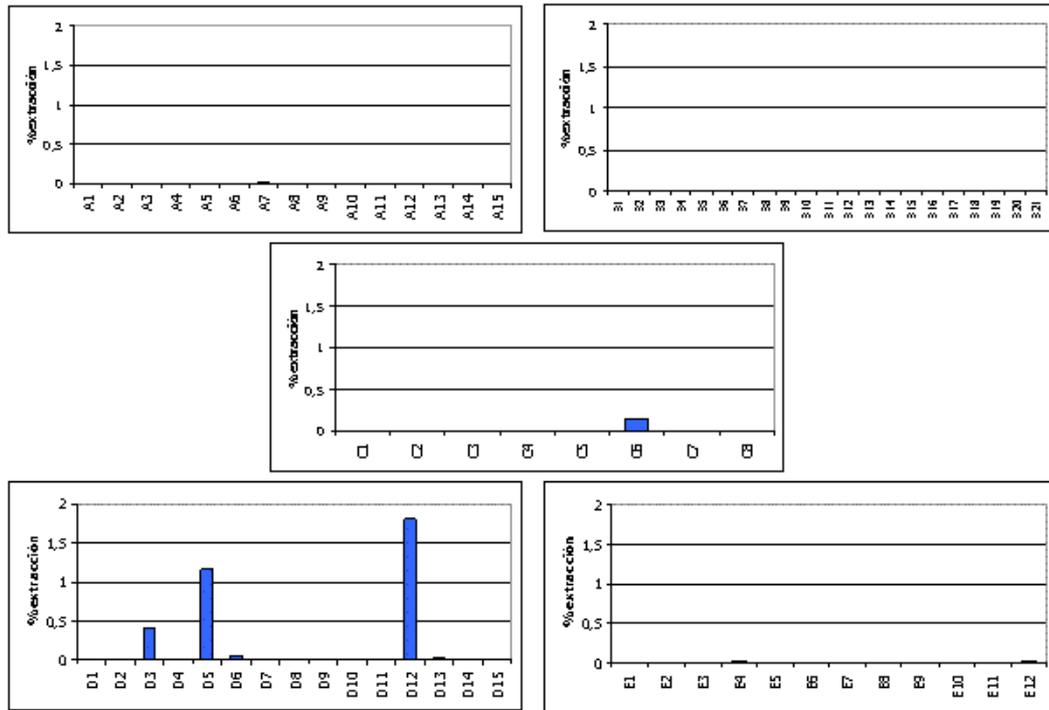


Figura 10.5. Porcentajes de extracción de hierro en agua

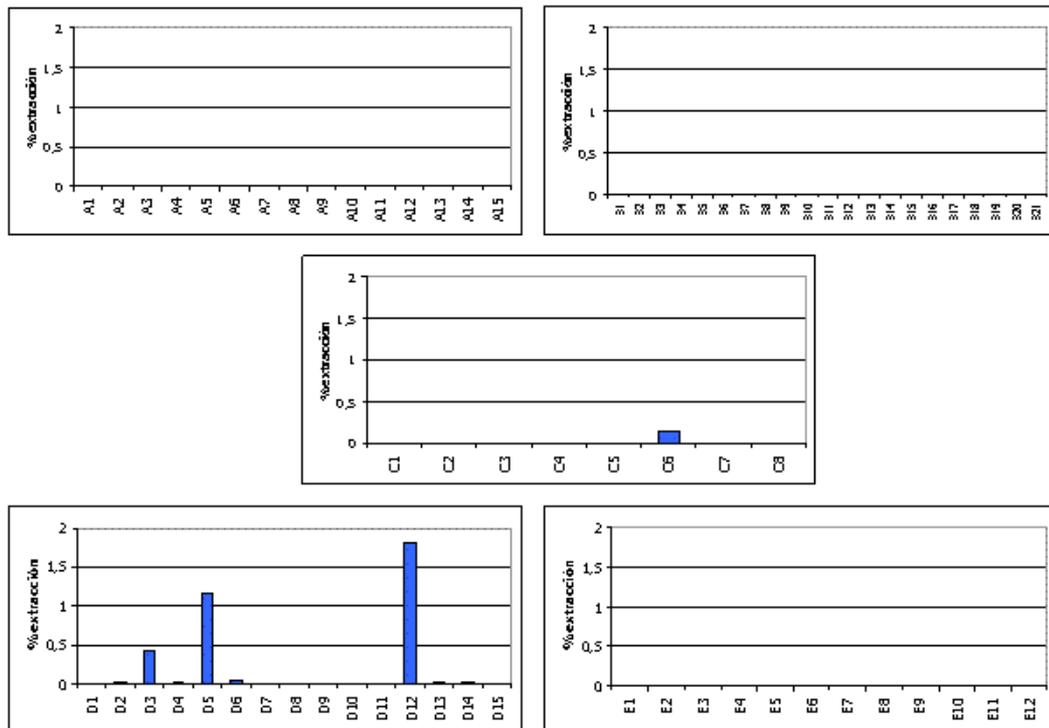


Figura 10.6. Porcentajes de extracción de arsénico en agua

El cobre en esta zona presenta una movilidad intermedia en agua. En la zona de Lo Poyo (A), los sedimentos arenosos, cercanos a la playa son los que presentan los mayores porcentajes de extracción. En las zonas Llano del Beal, Cabezo Rajao y Portman los valores son, en todos los casos, inferiores al 10%, y en la zona del Gorguel existe elevada variabilidad entre los puntos, con sedimentos en los que la movilización es prácticamente nula y otros en los que alcanza valores cercanos al 40% (Figura 10.7).

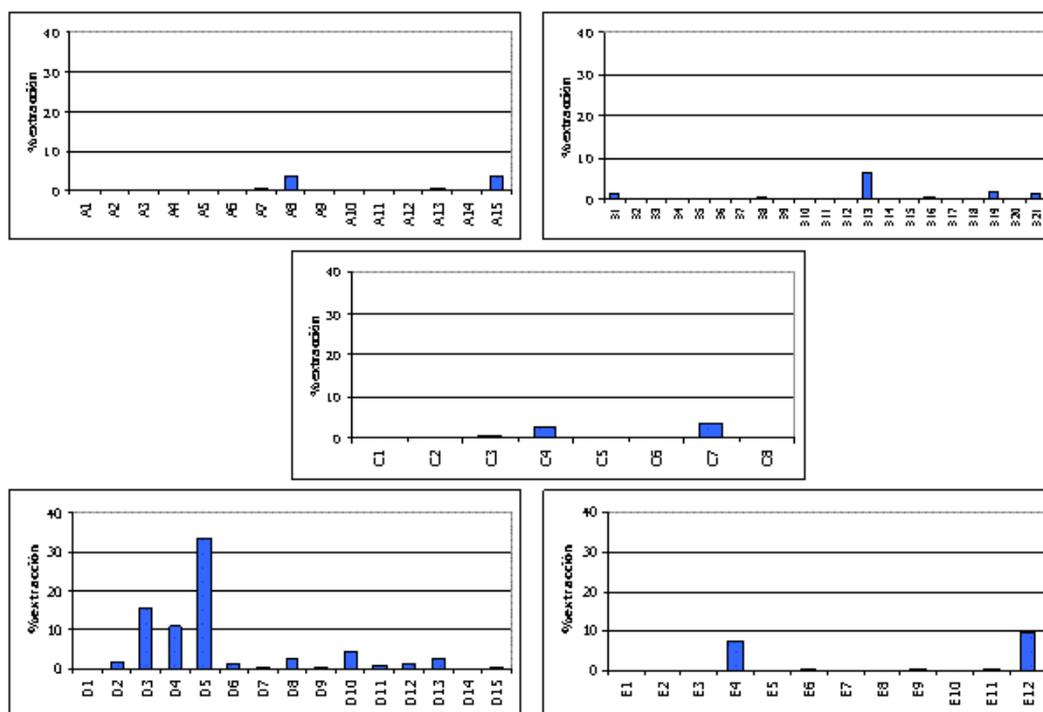


Figura 10.7. Porcentajes de extracción de cobre en agua

Finalmente, el manganeso es el metal que más movilidad tiene en este medio en las muestras seleccionadas. Al igual que en otros elementos, los porcentajes más elevados de extracción aparecen en la zona del Gorguel, en la que los sedimentos D4 y D5 alcanzan valores del 50%. Algunos de los sedimentos del Cabezo Rajao también presentan elevados porcentajes, dándose los máximos en los puntos C3, C4 y C5 (Figura10.8).

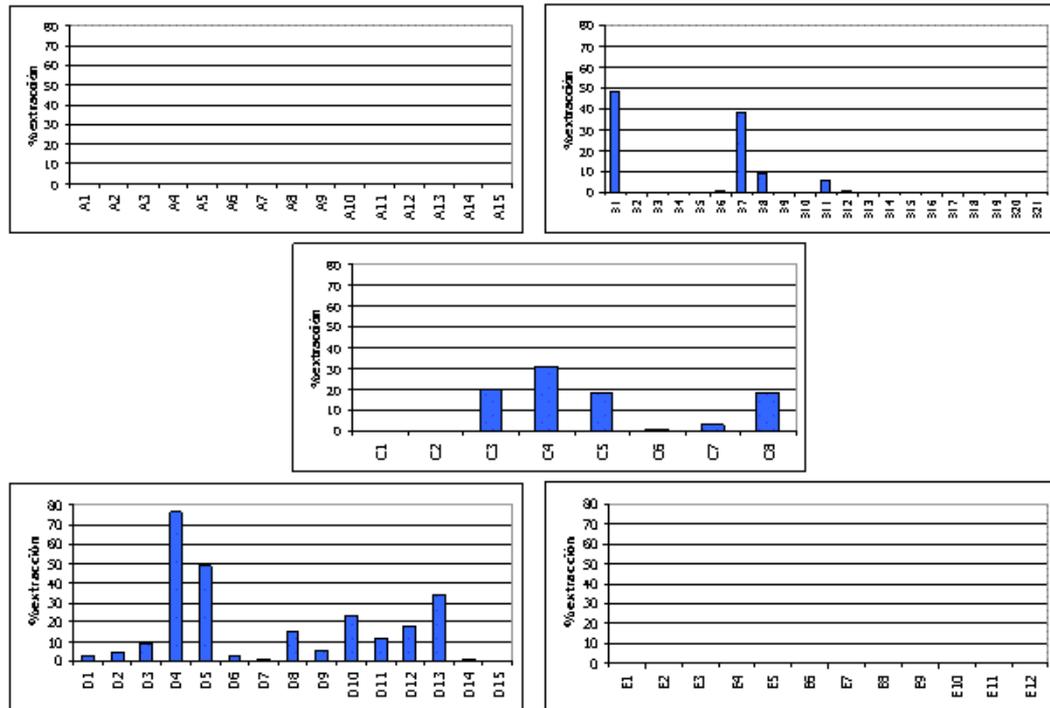


Figura 10.8. Porcentajes de extracción de manganeso en agua

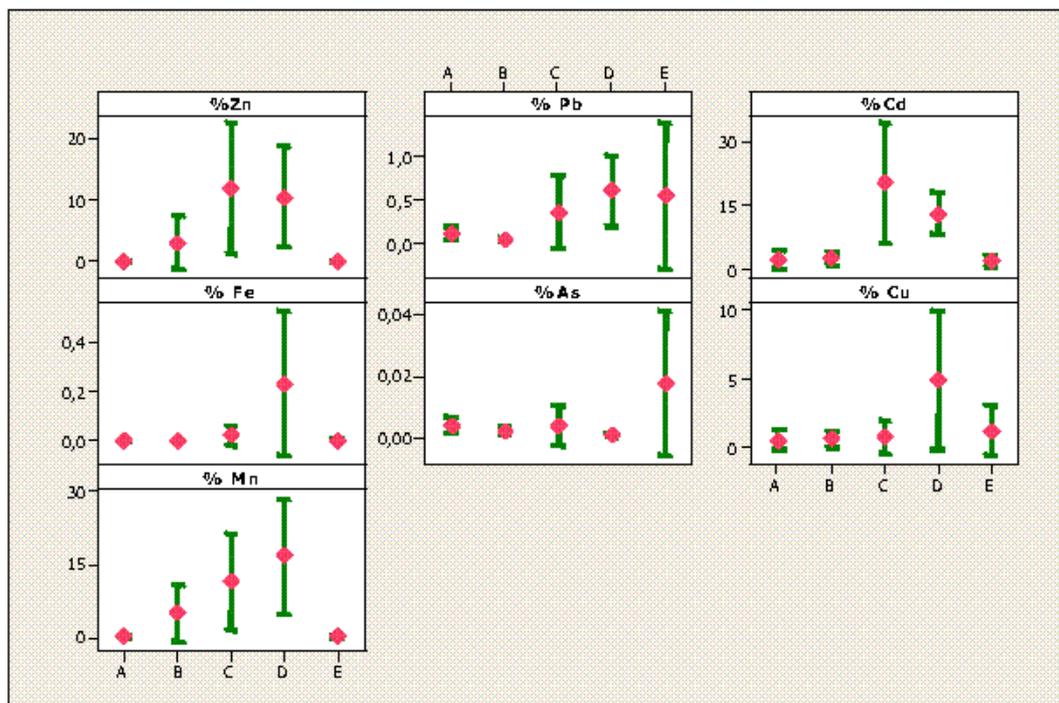


Figura 10.9. Porcentajes de extracción en las distintas zonas

En resumen, la movilidad del cinc en agua es más elevada en las zonas C y D, al igual que la de plomo y cadmio. El porcentaje de extracción de hierro, cobre

y manganeso presenta el mayor valor medio en la zona D mientras que en el caso del arsénico, es la zona E donde hay mayor contenido en arsénico soluble (Figura 10.9). Por el contrario, los menores porcentajes de extracción se dan en las zonas A y B.

10.3.1.2. Estudio de la composición mineralógica tras la extracción en agua.

En la Figura 10.10 se muestra la comparación entre la composición mineralógica media de las muestras antes y después de la extracción con agua.

En general, no se producen variaciones importantes en la composición mineralógica de los sedimentos tras la extracción, a excepción de aquellas muestras que presentan sulfatos hidratados, que desaparecen.

Se puede producir el aumento relativo de algunas fases (cuarzo y filosilicatos) como consecuencia del lavado de geles y fases mal cristalizadas que no pueden ser determinadas mediante Difracción de Rayos X.

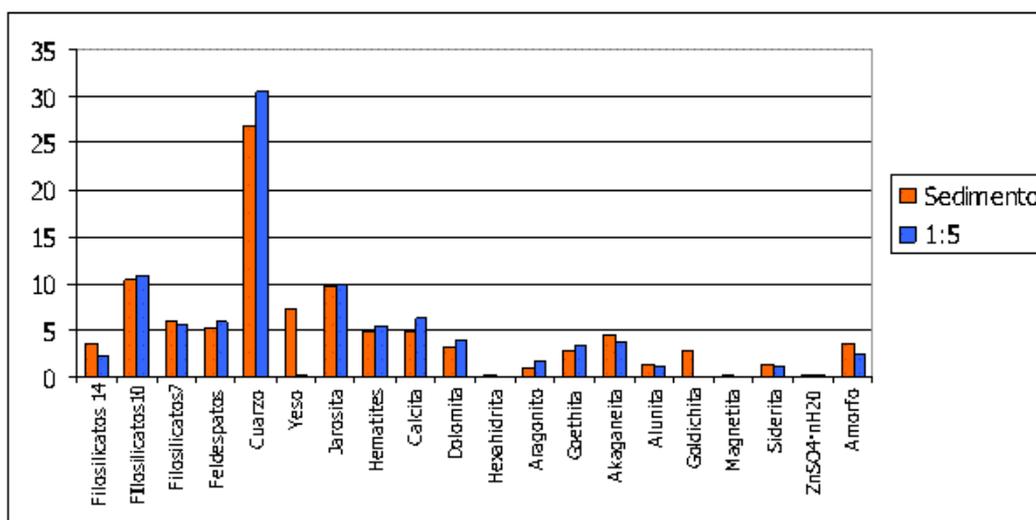


Figura 10.10. Composición mineralógica de las muestras originales y de los residuos tras la extracción en agua

10.3.1.3. Relación entre movilización de elementos traza y variación en la composición mineralógica en agua.

A partir de los datos mineralógicos obtenidos por Difracción de Rayos X en la muestra original y en el residuo tras la extracción con agua se ha calculado el índice de pérdida de cada fase mineral:

$$IP_{\text{soluble}} = (\text{Fase en muestra original} - \text{Fase tras extracción}) / \text{Fase en muestra original}$$

Para establecer las posibles relaciones entre la movilización de cada metal y las variaciones en la composición mineralógica de las muestras se ha realizado una matriz de correlación de Pearson entre los porcentajes de extracción para cada metal y los índices de pérdida de cada mineral (Tabla 10.7).

	99%		95%	
%Zn	Cadmio (r=0,748) Manganeso (r=0,794)	Cobre (r=0,664)	Yeso (r=0,333) Hexahidrita (r=0,383)	ZnSO ₄ (r=0,307) Hierro (r=0,374)
%Pb			Hierro (r=0,345)	Cobre (r=0,387)
%Cd	Manganeso (r=0,676)		Hexahidrita (r=0,431) Goethita (r=-0,399)	ZnSO ₄ (r=0,300) Cobre (r=0,399)
%Fe	Goethita (r=-0,531) Akaganeita (r=-0,521)	Cobre (r=0,503)		
%As	Aragonito (r=0,618)			
%Cu	Manganeso (r=0,519)			
%Mn			Yeso (r=0,333)	

Tabla 10.7. Matriz de correlación de Pearson entre movilización de elementos traza e índice de pérdida de cada fase mineral

De la Tabla 10.7 se deduce que el contenido en cinc soluble está ligado al yeso, la hexahidrita y otros sulfatos hidratados de cinc de manera positiva, esto es, asociado básicamente a la disolución de sulfatos hidratados en aquellas muestras que presentan esta fase en su composición mineralógica.

El caso del cadmio es similar al del cinc, asociado a la disolución de sulfatos hidratados. Por otro lado, el enriquecimiento en goethita y akaganeita coincide con una menor movilización de hierro, en concordancia con la correlación negativa que presentan. El manganeso también aparece positivamente

correlacionado con el contenido en yeso, de manera que se asocia a una disolución de los sulfatos solubles.

EL arsénico aparece correlacionado con el aragonito, ya que los valores más elevados de este elemento se dan en las muestras recogidas en la playa (Lo Poyo), en las que se ha cuantificado aragonito en su composición mineralógica.

Finalmente, el cobre no presenta correlaciones significativas con la variación de ninguna fase mineral.

Tras el análisis de las correlaciones, se ha realizado un análisis factorial, cuyos resultados vienen recogidos en la Tabla 10.8 y la Figura 10.11.

	Variables	% Varianza
F1	%Zn(+), %Cd(+), %Fe(+), %Cu(+), %Mn(+), Jarosita(+), Calcita (-), Goethita (+), Akaganeita (+)	27
F2	Filosilicatos 14 (+), Feldespato(-), Cuarzo(-), Hematites (+), Magnetita(-), Siderita(-), Amorfos(+)	23
F3	%Pb (-), %As (-),Filosilicatos 10 y 7 (+), Dolomita (-), Aragonito (-)	16
F4	Yeso (-), Hexahidrita (-), Sulfatos Zn hidratados (-)	10

Tabla 10.8. Factores obtenidos tras el análisis de componentes principales entre movilización de elementos traza y composición mineralógica tras la extracción en agua

F1: Este factor viene definido por los elementos traza que más se movilizan en agua (a excepción del hierro). Además, aparecen las jarositas, asociadas a materiales muy mineralizados que aparecen en zonas cercanas a los focos de contaminación.

F2: En este factor aparecen los minerales de hierro (siderita y magnetita) no afectados por la extracción en agua. En este factor también se engloban el cuarzo y los feldespatos, es decir las fases insolubles en agua.

F3: En este factor se engloban el plomo y el arsénico en la parte negativa y en la positiva los carbonatos dolomita y aragonito.

F4: Este factor viene definido por los sulfatos solubles, que desaparecen tras la extracción en agua.

Al representar los factores 1 y 2, se agrupan en el segundo cuadrante las muestras de Portman, ya que el son las que presentan magnetita y siderita en su composición. Lo más destacable es que los sedimentos con mayores porcentajes de elementos traza extraíbles en agua son los de las zonas del Cabezo Rajao y el

Gorguel, agrupándose en el primer o cuarto cuadrantes, en función de su composición mineralógica (Figura 10.11). La mayor movilidad coincide con los sedimentos afectados por contaminación primaria, ya que presentan más capacidad de sufrir alteración supergénica por el tipo de materiales.

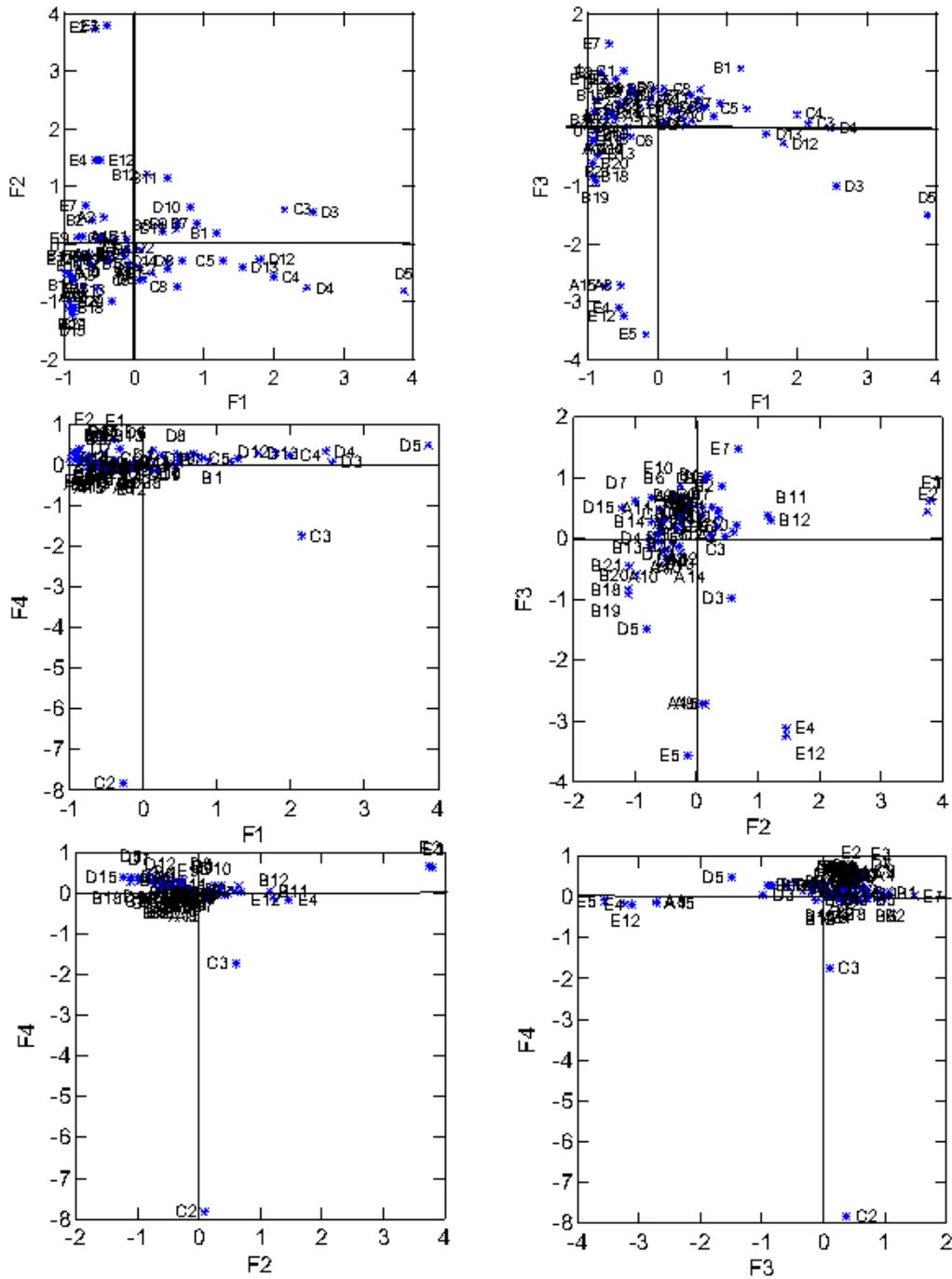


Figura 10.11. Representación gráfica de los factores obtenidos

10.3.2. Aguas de poro.

La química de la solución del suelo proporciona información de gran utilidad a la hora de estudiar la biodisponibilidad y los efectos tóxicos de los elementos traza. De hecho, debido a que las plantas absorben la mayoría de los nutrientes del agua de poro, se asume que el contenido soluble de elementos traza es la parte disponible para los organismos (De Vivo et al., 2008). El análisis de las aguas de poro permite estudiar la naturaleza, dirección, extensión y velocidad de las reacciones químicas.

Se puede asumir que (Di Bonito, 2005):

- 1.** Si el agua de poro representa el medio del que las plantas extraen los nutrientes, su análisis permite predecir la respuesta de la planta ante sustancias químicas presentes en el suelo.
- 2.** Si el agua de poro se relaciona con las aguas tanto superficiales como subterráneas, la composición del agua de poro puede emplearse en la predicción de la concentración y forma química de los elementos que pueden alcanzar las aguas superficiales y subterráneas a través del transporte desde el suelo.
- 3.** Si el agua de poro representa el equilibrio entre la fase líquida y sólida del suelo, la composición de las aguas de poro permite estudiar y predecir los componentes de la fase sólida que controlan la distribución química en el suelo.

10.3.2.1. Características generales y contenido en elementos traza en las muestras de agua de poro.

Las Tablas 10.9 a 10.13 recogen los valores máximos y mínimos, junto con los valores medios de elementos traza y los resultados de las determinaciones analíticas generales.

En ellas se observa como los valores más ácidos de pH se dan en los puntos del Gorguel y el Cabezo Rajao. Además es en el Gorguel donde se han determinado las concentraciones medias más elevadas de elementos traza, a excepción del cinc que es ligeramente superior en el Cabezo Rajao.

Por el contrario, las menores concentraciones de elementos traza se dan en Lo Poyo y Portman.

ZONA A	pH	Eh	CE	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Al
		mV	dS/m	mg/l							
Máximo	8,2	258	70,5	0,6	2,3	0,9	0,8	0,1	0,7	1,1	<ld
Media	7,9	178,7	23,7	0,2	0,4	0,2	0,3	0,03	0,1	0,3	<ld
Mínimo	7,7	108	1,8	0,04	0,06	0,02	0,2	0,0006	0,06	0,1	<ld
Desv Est	0,2	61,9	27,7	0,2	1,0	0,4	0,3	39,2	0,3	0,4	-

Tabla 10.9. Concentración de elementos traza en las aguas de poro (Zona A)

ZONA B	pH	Eh	CE	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Al
		mV	dS/m	mg/l							
Máximo	7,9	555	33,5	2050	0,6	15	1,1	0,008	0,3	3400	222
Media	6,7	320,5	10,1	384,4	0,1	2,6	0,3	0,004	0,1	543,0	27,8
Mínimo	5,8	202	1,6	0,1	0,009	0,02	0,1	0,002	0,004	0,3	0,03
Desv Est	0,7	109,1	11,1	697,4	0,2	5,1	0,4	3,2	0,1	1177,6	78,5

Tabla 10.10. Concentración de elementos traza en las aguas de poro (Zona B)

ZONA C	pH	Eh	CE	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Al
		mV	dS/m	mg/l							
Máximo	7,9	484	42,2	39400	1	91	9600	1,1	19,4	2500	1770
Media	5,0	356,7	19,4	9566,5	0,5	24,2	1375	0,2	7,0	682,4	256,1
Mínimo	1,7	264	3,6	0,3	0,03	0,1	0,1	0,0001	0,04	1	0,04
Desv Est	2,2	81,0	14,3	14248,9	0,4	33,0	3627	387,9	8,8	890,7	667,6

Tabla 10.11. Concentración de elementos traza en las aguas de poro (Zona C)

ZONA D	pH	Eh	CE	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Al
		mV	dS/m	mg/l							
Máximo	7,1	576	53,9	20700	2,7	220	49100	1,1	44,25	14950	2130
Media	3,6	385,6	19,9	3190,7	1,4	42,3	6225	0,4	8,4	2195,7	606,9
Mínimo	1,6	167	2,4	46	0,3	0,2	0,5	0,006	0,17	25	27
Desv Est	2,0	131,4	17,0	6332,3	1,0	69,9	15528	453,8	14,6	4551,8	783,3

Tabla 10.12. Concentración de elementos traza en las aguas de poro (Zona D)

ZONA E	pH	Eh	CE	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Al
		mV	dS/m	mg/l							
Máximo	7,9	373	56	173	2,5	4	11	0,006	0,3	85	0,2
Media	7,1	193,2	16,7	29,2	0,7	0,9	2,3	0,003	0,1	24,2	0,1
Mínimo	4,6	115	1,1	0,04	0,5	0,0002	0,1	0,002	0,02	0,1	0,2
Desv Est	1,3	95,1	20,4	70,4	1,0	1,6	4,3	2,7	0,1	37,2	0,1

Tabla 10.13. Concentración de elementos traza en las aguas de poro (Zona E)

Las Tablas 10.14 a 10.18 muestran los valores medios, máximos y mínimos junto con la desviación típica de los iones, determinados por cromatografía iónica.

Es de destacar que las zonas con puntos influidos por el mar presentan los valores medios más elevados de sodio y cloruros.

Por otro lado, y aunque en todas las zonas es elevada la concentración de sulfatos, en el Gorguel se dan los máximos de las cinco zonas.

Finalmente, en Lo Poyo se da el mayor valor medio de carbonatos solubles.

ZONA A	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻
Máximo	26492	1212	1222	7289	20	24331	11	84	1834	9576	34760
Media	10185	312	712	2588	5	7713	6	27	477	3638	12005
Mínimo	100	34	209	124	-	97	-	-	12	473	443
Desv Est	12387,9	453,8	398,4	3390,0	7,5	9542,9	7,6	32,7	716,6	3584,6	15156,1

Tabla 10.14. Concentración de elementos solubles en las aguas de poro (Zona A)

ZONA B	Li ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻
Máximo	1	5216	7	6878	1136	15355	9	4151	11	<ld	884	32425	24336
Media	0,2	1033	1	1989	795	3084	3	1004	2	<ld	168	10157	4248
Mínimo	-	90	-	19	229	526	1	75	-	2	3	2003	-
Desv Est	0,4	1731,7	2,5	3032,2	272,4	5084,5	2,9	1361,7	3,7	59,4	297,9	11981,3	8216,8

Tabla 10.15. Concentración de elementos solubles en las aguas de poro (Zona B)

ZONA C	Li ⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻
Máximo	3	706	9781	1242	16365	100	728	2	6	1527	65009	5210
Media	2	251	2920	785	5920	23	217	2	4	234	29602	2733
Mínimo	-	23	20	11	377	1	52	1	2	1	2199	895
Desv Est	1,6	272,1	3747,9	375,0	5798,7	35,5	232,4	0,7	11,2	570,2	26109,4	2227,2

Tabla 10.16. Concentración de elementos solubles en las aguas de poro (Zona C)

ZONA D	Li ⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻
Máximo	12	2344	11488	1796	43771	95	2479	7	6	3459	159185	3907
Media	2	550	2662	998	7852	35	645	1	2	911	34704	492
Mínimo	-	-	23	665	117	2	11	-	1	-	1775	-
Desv Est	4,4	867,1	3562,0	383,3	13252,8	35,5	833,6	2,2	46,8	1294,0	47810,8	1241,5

Tabla 10.17. Concentración de elementos solubles en las aguas de poro (Zona D)

ZONA E	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻
Máximo	24762	3301	766	20889	12	21242	34	73	857	79039	17818
Media	5398	634	489	4079	5	5571	6	22	310	15418	4128
Mínimo	55	-	314	212	1	55	-	1	-	636	-
Desv Est	9563,2	1309,1	173,6	8244,7	3,8	7960,4	13,8	27,0	381,5	31300,8	6801,3

Tabla 10.18. Concentración de elementos solubles en las aguas de poro (Zona E)

10.3.2.2. Relación entre elementos traza e iones solubles.

El pH está correlacionado con todos los elementos traza de forma negativa, lo que indica que al aumentar el primero disminuye la concentración de los mismos en los extractos.

Además, el contenido en cinc y manganeso está positivamente correlacionado con la conductividad eléctrica. Estos metales son los que presentan mayor movilidad en agua, por lo que su relación con las sales solubles se confirma con el análisis de correlaciones (Tabla 10.19).

Entre las correlaciones que se establecen entre los elementos traza y los aniones, destacan las existentes entre los sulfatos presentes en las aguas de poro y la concentración de cinc, hierro, arsénico, manganeso y aluminio (Tabla 10.19).

	99%		95%	
Eh	pH (r=-0,805)			
CE				
Zn			CE (r=0,426)	
Pb	pH (r=-0,570) Li ⁺ (r=0,678) F (r=0,509) SO ₄ ²⁻ (r=0,572)	CE (r=0,587) Mg ²⁺ (r=0,549) NO ₂ (r=0,733)	As (r=0,429) Al (r=0,412)	Mn (r=0,446) CO ₃ ²⁻ (r=0,471)
Cd			pH (r=-0,410)	Zn (r=0,421)
Fe			pH (r=-0,455)	
As	pH (r=-0,708) Fe (r=0,701)	Eh (r=0,583)		
Cu			pH (r=-0,473)	
Mn	Zn (r=0,536) As (r=0,522)	Fe (r=0,916)	pH (r=-0,444)	CE (r=0,457)
Al	pH (r=-0,704) Fe (r=0,548)	Eh (r=0,517) As (r=0,832)	Mn (r=0,403)	
Li ⁺	pH (r=-0,822) Fe (r=0,691) Mn (r=0,573)	CE (r=0,788) As (r=0,859) Al (r=0,944)	Eh (r=0,436) Cd (r=0,439)	Zn (r=0,434)
Na ⁺	CE (r=0,712)		Eh (r=-0,436)	
K ⁺	pH (r=-0,538) Fe (r=0,626) Mn (r=0,697) Li ⁺ (r=0,589)	Zn (r=0,513) As (r=0,578) Al (r=0,538)	CE (r=0,446)	
Ca ²⁺	Li (r=0,621)			
Mg ²⁺	CE (r=0,729) Fe (r=0,753) Li ⁺ (r=0,515)	Zn (r=0,583) Mn (r=0,874) K ⁺ (r=0,788)	As (r=0,432)	Na ⁺ (r=0,433)
F	pH (r=-0,716) Fe (r=0,561) Mn (r=0,608) Li ⁺ (r=0,709)	CE (r=0,504) As (r=0,535) Al (r=0,624)	Eh (r=0,426)	K ⁺ (r=0,477)
Cl ⁻	CE (r=0,673) Na ⁺ (r=0,969)	Li ⁺ (r=0,688)	Eh (r=-0,459)	
NO ₂ ⁻	CE (r=0,744) Mg ²⁺ (r=0,903)	Na ⁺ (r=0,791) Cl (r=0,778)		
Br ⁻	CE (r=0,696) K ⁺ (r=0,701) F (r=0,741)	Fe (r=0,611) Mg ²⁺ (r=0,751) NO ₂ (r=0,504)		
NO ₃	Cd (r=0,602)			
SO ₄ ²⁻	pH (r=-0,538) Zn (r=0,639) As (r=0,580) Li ⁺ (r=0,756) Mg ²⁺ (r=0,910) NO ₂ (r=0,744)	CE (r=0,685) Fe (r=0,780) Mn (r=0,835) K ⁺ (r=0,700) F (r=0,741) Br (r=0,777)	Al (r=0,497)	
CO ₃ ²⁻	CE (r=0,842) Mg ²⁺ (r=0,703) Cl (r=0,534) Br (r=0,690)	Na ⁺ (r=0,826) F (r=0,534) NO ₂ (r=0,669)	NO ₃ (r=0,420)	

Tabla 10.19. Matriz de correlación de Pearson entre el contenido en elementos traza y sales solubles en las aguas de poro

10.3.3. Extraíbles en DTPA.

La transferencia de elementos traza desde el suelo a la planta es un proceso complejo en el que influyen muchos factores geoquímicos, climáticos y biológicos. Se define fracción biodisponible para la planta como la fracción del contenido total del elemento que puede ser absorbida por las raíces (Kabata-Pendias, 2001). La fracción disponible para las plantas puede estimarse a través de extracciones químicas o bien puede determinarse directamente determinando el contenido del elemento en los tejidos vegetales. Existen diversas extracciones químicas, de las que se ha seleccionado la extracción con DTPA, que es uno de los métodos más usados en el análisis de suelo para medir los niveles disponibles para las plantas de los micronutrientes Cu, Fe, Mn y Zn (Martens y Lindsay, 1990). El DTPA ha sido propuesto por formar quelatos solubles en agua con los cationes metálicos libres disminuyendo así sus actividades en la solución. En respuesta, los cationes son desorbidos de las superficies del suelo o se disuelven de las fases sólidas lábiles para mantener el equilibrio.

10.3.3.1. Movilización de elementos traza en DTPA.

Los resultados obtenidos tras la extracción con DTPA están recogidos en la Tabla 10.20.

	Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg
Máximo	669	352	8,4	108	1,2	9,2	252
Media	195	125	1,7	49	0,2	4,1	98
Mínimo	2	6	0,1	4	-	0,3	11
Desv. Est	195,6	95,9	2,0	37,1	0,3	3,0	71,9

Tabla 10.20. Fracción soluble (%) de elementos traza tras la extracción con DTPA

Se ha estudiado la movilización de cada uno de los elementos traza con DTPA, mediante el cálculo de los porcentajes de extracción:

$$\text{Concentración extraída elemento (mg kg}^{-1}\text{) / Concentración total (mg kg}^{-1}\text{) x100}$$

La Tabla 10.21 muestra los porcentajes de extracción para cada elemento con este procedimiento y la Figura 10.12 muestra los porcentajes de extracción de cada elemento traza en cada muestra. Únicamente se ha realizado en las muestras de suelo sobre las que existía vegetación, con el fin de evaluar la fracción biodisponible para las plantas con este extractante.

El porcentaje de extracción es en general bajo para todos los elementos estudiados, no supera el 10%, siendo plomo, cadmio, cobre y cinc los elementos que presentan una mayor movilización, con porcentajes de extracción de 7%, 4,5%, 4% y 3,9% respectivamente.

El porcentaje de extracción varía según la zona, así en las muestras de la zona de Portman el porcentaje de extracción de plomo es mayor que en el resto (Figura 10.12).

La movilización de manganeso (2,7%) es ligeramente menor a los anteriores y el hierro y el arsénico son los elementos de menor movilidad, con un porcentaje de extracción medio del 0,1%. Para todas las muestras el contenido en mercurio estaba por debajo del límite de detección.

	Zn %	Pb %	Cd %	Fe %	As %	Cu %	Mn %
Máximo	9,7	9,9	9,6	0,3	0,2	7,6	7,2
Media	3,9	7,0	4,5	0,1	0,1	4,0	2,7
Mínimo	0,8	0,8	1,1	0,0	0,0	0,2	0,9
Desv. Est	2,7	2,8	2,8	0,1	0,1	2,4	1,6

Tabla 10.21. % medio de extracción tras la extracción con DTPA

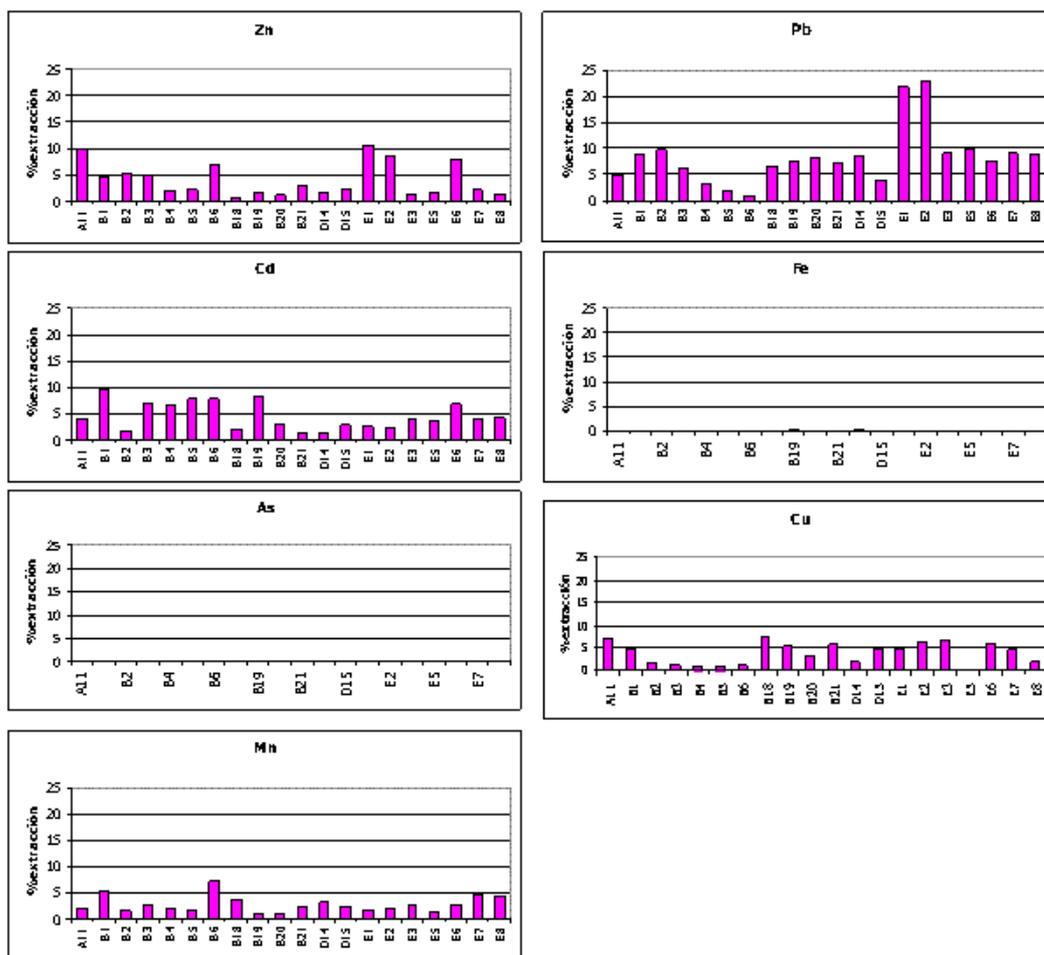


Figura 10.12. Porcentajes de extracción con DTPA

10.4. Movilidad potencial de elementos traza.

Este estudio se basa en el empleo de reactivos que actúan en condiciones forzadas sobre los materiales seleccionados, simulando situaciones de cambio de uso y/o condiciones ambientales distintas a las actuales (Dean, 2003).

10.4.1. Extracción en medio ácido.

10.4.1.1. Movilización de elementos traza en medio ácido.

Para simular la acción de aguas ácidas sobre los materiales estudiados se realizó la extracción con HNO_3 0,1M ajustando el pH a 1, tras la cual se recogieron los sobrenadantes sobre los que se midieron las concentraciones de elementos traza, que se muestran en la Tablas 10.22 a 10.26 junto con los valores máximos, mínimos, medios y la desviación estándar para cada uno de ellos.

Los extractos obtenidos presentan mayores concentraciones de elementos traza que las determinadas tras la extracción con agua, siendo muy elevadas en el caso del cinc, con un valor medio de 3339 mg kg^{-1} , el plomo (821 mg kg^{-1}), el hierro con un valor medio de 2937 mg kg^{-1} y el manganeso (764 mg kg^{-1}).

Las concentraciones de cobre y cadmio son más bajas, con valores medios de 23 mg kg^{-1} y 18 mg kg^{-1} , respectivamente. El arsénico es el que presenta concentraciones más bajas, con un valor medio de 5 mg kg^{-1} . El mercurio, como en el caso de la extracción con agua está por debajo del límite de detección.

ZONA A	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn
	mg/kg						
Máximo	14752	2805	41	6423	9,5	50	1860
Media	5165	1691	22	2596	4,2	24	894
Mínimo	65	23	0,02	50	0,2	2	116
Desv Est	5627,2	946,9	13,3	2412,9	2,7	14,2	654,1

Tabla 10.22. Concentración de elementos traza tras la extracción en ácido
(Zona A)

ZONA B	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn
	mg/kg						
Máximo	8044	2600	53	7829	15,7	42	2712
Media	2319	811	20	1929	3,6	11	613
Mínimo	8	15	0,1	7	0,002	0,2	3
Desv Est	2688,2	716,7	17,0	2418,2	4,01	9,0	666,2

Tabla 10.23. Concentración de elementos traza tras la extracción en ácido
(Zona B)

ZONA C	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn
	mg/kg						
Máximo	13707	1996	47	7934	7,4	52	2583
Media	6866	785	33	3185	5,2	35	967
Mínimo	1683	331	16	908	1,8	12	130
Desv Est	3769,7	580,2	12,2	2501,1	2,18	14,7	895,1

Tabla 10.24. Concentración de elementos traza tras la extracción en ácido
(Zona C)

ZONA D	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn
	mg/kg						
Máximo	5612,0	2143,0	19,0	8795,0	27,6	98,0	794,0
Media	1146,0	297,2	7,2	2731,4	8,15	29,7	437,9
Mínimo	0,1	13,0	0,020	25,0	0,000	3,000	4,0
Desv Est	1593,0	544,1	6,2	3003,8	10,01	34,1	284,5

Tabla 10.25. Concentración de elementos traza tras la extracción en ácido
(Zona D)

ZONA E	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn
	mg/kg						
Máximo	4806	1905	27	15951	24,6	32	4141
Media	1183	520	10	4246	6,0	16	908
Mínimo	0,1	6	0,02	7	0,0001	0,2	2
Desv Est	1578,2	711,8	10,4	6295,6	7,84	11,5	1370,2

Tabla 10.26. Concentración de elementos traza tras la extracción en ácido (Zona E)

Se ha estudiado la movilización de cada uno de los elementos traza en medio ácido, mediante el cálculo de los porcentajes de extracción:

Concentración extraída elemento (mg kg⁻¹) / Concentración total (mg kg⁻¹) x100

La Tabla 10.27 recoge los valores máximos, mínimos, medios y la desviación estándar de la fracción soluble en medio ácido para los elementos traza estudiados, mientras que las Figuras 10.13 a 10.19 muestran los porcentajes de extracción de cada elemento en cada una de las zonas.

Cadmio, plomo, cinc y manganeso son los metales que presentan una mayor movilización en este medio, ya que los porcentajes de extracción son respectivamente 43%, 31%, 30% y 23%, y como puede observarse en las Figuras 10.9 a 10.15 en algunas muestras se llegan a alcanzar porcentajes de extracción cercanos al 100%. La movilización de cobre (9%) es intermedia y el hierro y el arsénico son los elementos de menor movilidad, con un porcentaje de extracción medio del 2 y 1% respectivamente.

	Zn (%)	Pb (%)	Cd (%)	Fe (%)	As (%)	Cu (%)	Mn (%)
Media	30	31	43	2	1	9	23
Mínimo	-	-	-	-	-	1	-
Máximo	96	97	98	7	3	37	87
Desv Est	25,2	31,1	32,7	1,9	0,7	7,7	23,1

Tabla 10.27. Fracción soluble (%) de elementos traza tras la extracción en ácido

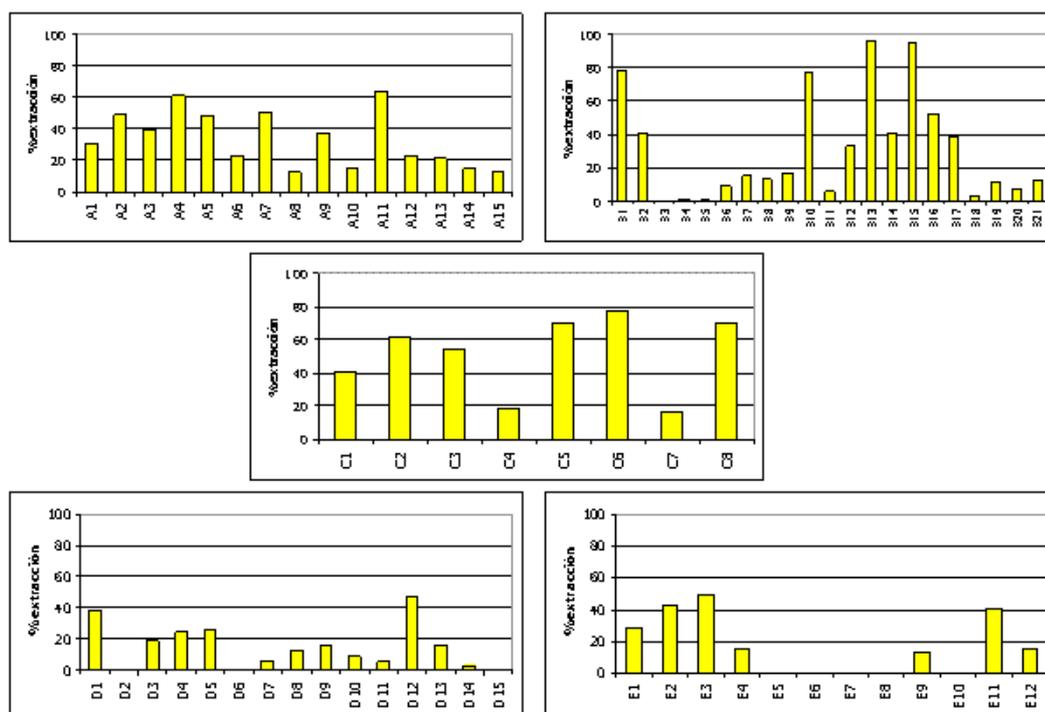


Figura 10.13. Porcentajes de extracción de Zn en medio ácido

En la zona de Lo Poyo, a excepción de los puntos de muestreo A4, A5 y A9, todos tienen carbonatos en su composición, por lo que los elevados porcentajes de extracción de cinc, plomo, cadmio y manganeso en este medio muestran su relación con fases carbonatadas. El hierro, arsénico y cobre no están tan relacionados con los carbonatos y su extracción en esta fase es menor.

En los sedimentos A4, A5 y A9, que no presentan carbonatos en su composición mineralógica, los porcentajes de extracción obtenidos se relacionan con sulfuros, fases amorfas o mal cristalizadas (Figuras 10.13 a 10.19).

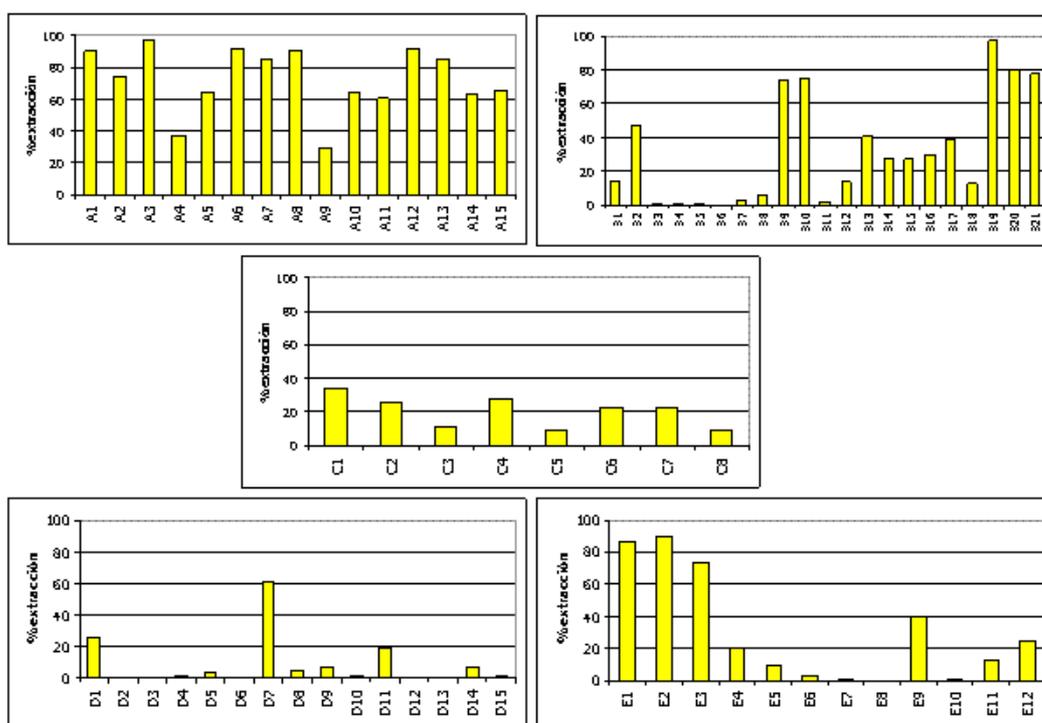


Figura 10.14. Porcentajes de extracción de Pb en medio ácido

En el Llano del Beal, los sedimentos B1, B6, B7, B8, B11 y B12 no presentan carbonatos en su composición, por lo que el porcentaje extraído es en general escaso y posiblemente ligado a amorfos o fases mal cristalizadas que se ven atacadas en este medio. En el resto de sedimentos, los elementos traza extraídos van ligados a las fases carbonatadas, especialmente cinc, plomo, cadmio, cobre y manganeso, aunque también pueden estar ligados a fases no carbonatadas que se alteren en este medio. Al igual que en Lo Poyo, los porcentajes de extracción de arsénico y hierro son escasos.

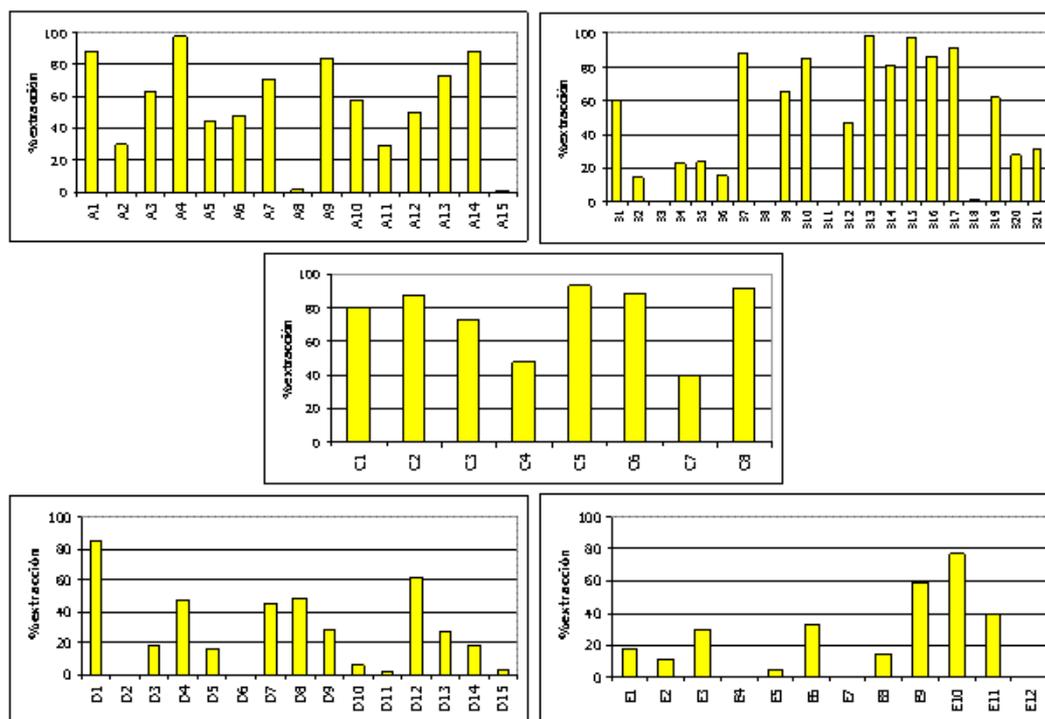


Figura 10.15. Porcentajes de extracción de Cd en medio ácido

En el Cabezo Rajao ninguno de los sedimentos tiene carbonatos en su composición, a excepción del C2 que está afectado por una balsa estabilizada con carbonatos, por lo que la extracción en este medio se hace a partir de sulfuros, jarositas mal cristalizadas o amorfos.

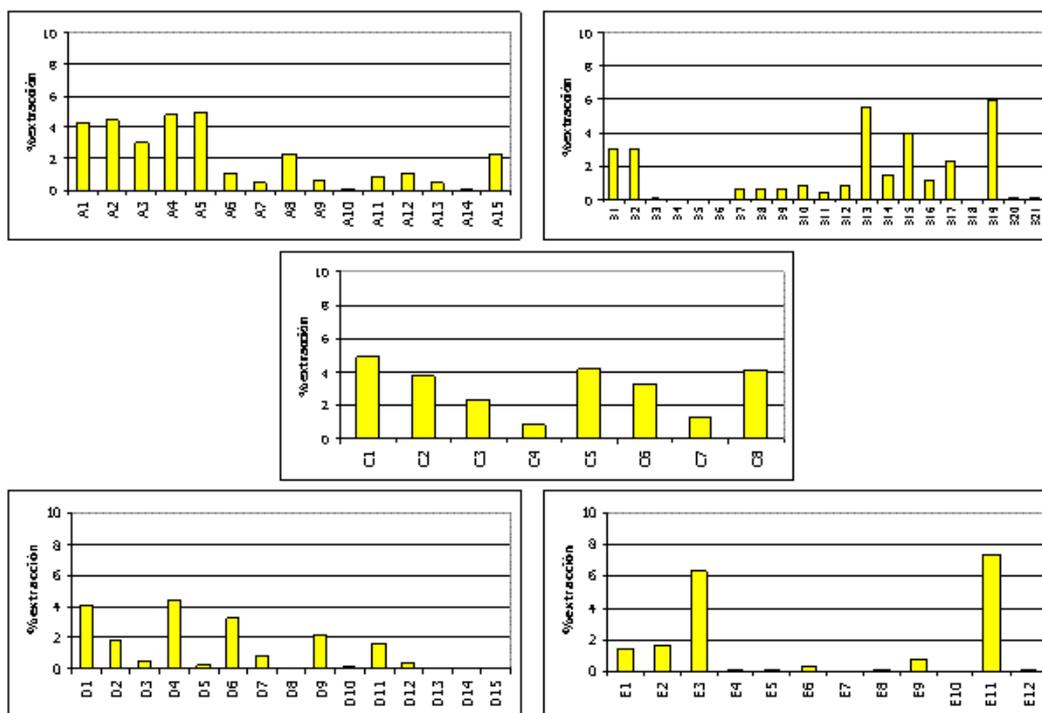


Figura 10.16. Porcentajes de extracción de Fe en medio ácido

Al igual que en el Cabezo Rajao, en el Gorguel el contenido en carbonatos es nulo, por lo que los porcentajes de extracción de elementos traza en esta fase se debe a la alteración de jarositas mal cristalizadas, sulfuros o fases amorfas (Figuras 10.13 a 10.19).

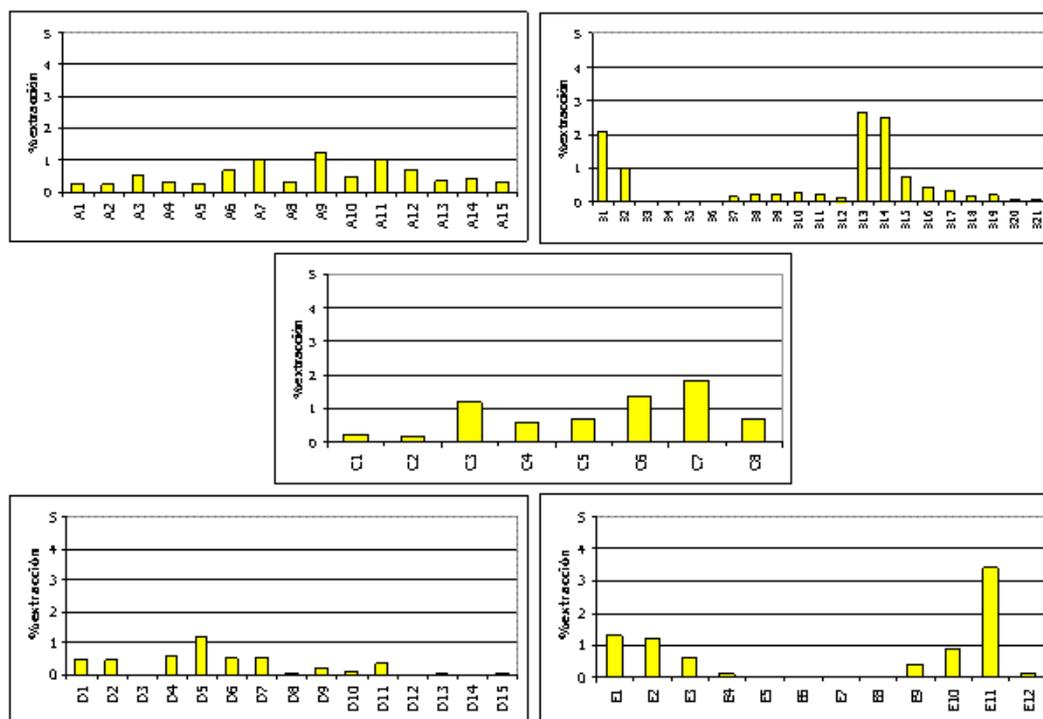


Figura 10.17. Porcentajes de extracción de As en medio ácido

Por último, en la zona de Portman, los porcentajes de extracción son muy variables según el elemento. Así, para el hierro y el arsénico se dan porcentajes elevados en los sedimentos E1, E2, E3 y E11, todos situados en la Bahía y con elevado porcentaje de siderita, por lo que ambos elementos van ligados a esta fase.

El cinc, plomo y cadmio extraído también es elevado en muestras de la Bahía, aunque también los es en sedimentos afectados por contaminación terciaria, es decir, mezclados con carbonatos, por lo que los elementos aparecen ligados a estas fases (Figuras 10.13 a 10.19).

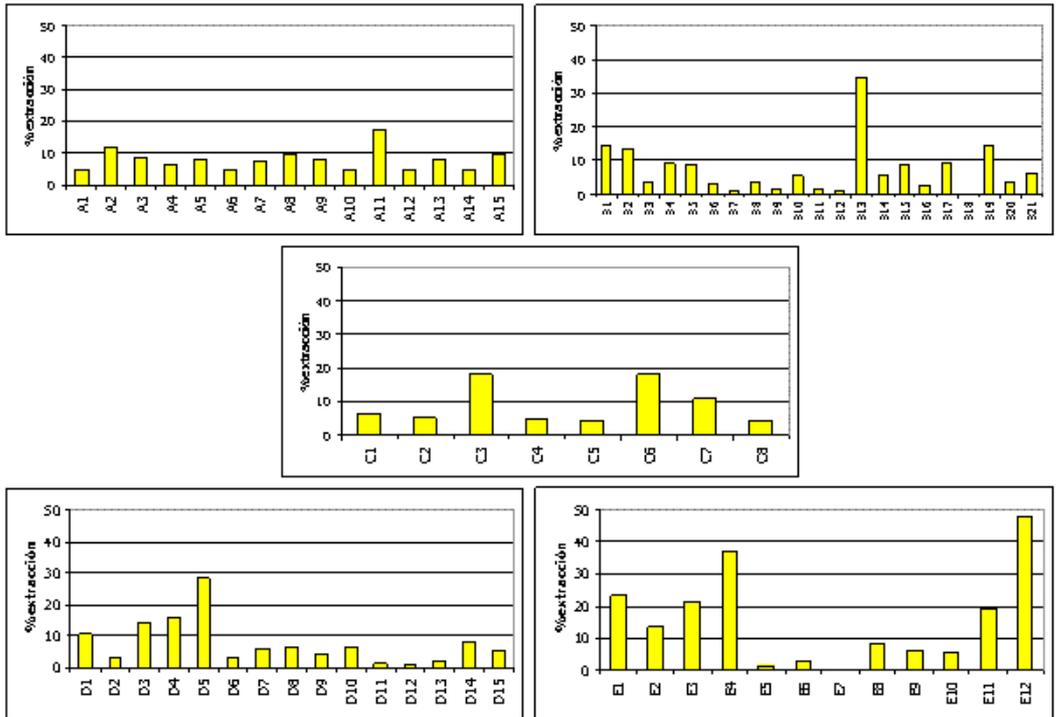


Figura 10.18. Porcentajes de extracción de Cu en medio ácido

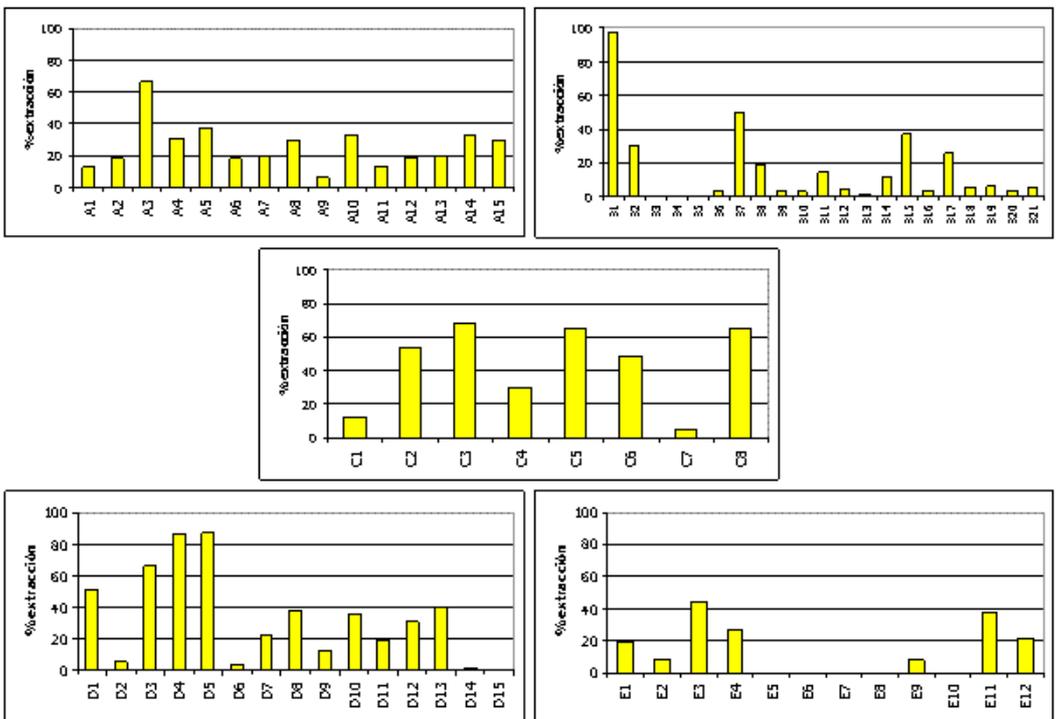


Figura 10.19. Porcentajes de extracción de Mn en medio ácido

10.4.1.2. Estudio de la composición mineralógica tras la extracción en medio ácido.

Tras el ataque con ácido nítrico, la mineralogía residual muestra la desaparición de todas las fases solubles en agua, como sulfatos hidratados de hierro y cinc y el yeso (Figura 10.20). La calcita experimenta una movilización casi total, al contrario que otros carbonatos presentes (dolomita y siderita) que sólo se atacan ligeramente.

En resumen, en todas las muestras desaparece el yeso, las fases solubles y las fases carbonatadas son atacadas. Además, el contenido en amorfos también disminuye. El resto de los minerales presentes no se ven afectados en este medio y los incrementos relativos de concentración que experimentan se deben a la desaparición o disminución de las fases antes mencionadas, como es el caso de los filosilicatos, el cuarzo, hematites y goethita.

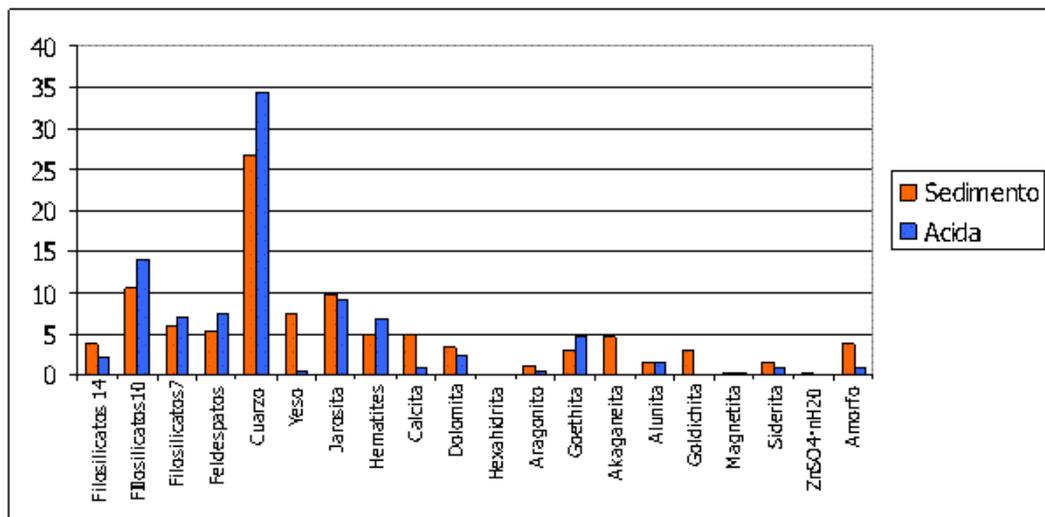


Figura 10.20. Composición mineralógica de las muestras originales y de los residuos tras la extracción en ácido

10.4.1.3. Relación entre movilización de elementos traza y variación en la composición mineralógica en medio ácido.

A partir de los datos mineralógicos obtenidos por Difracción de Rayos X en la muestra original y en el residuo tras la extracción con ácido nítrico se ha calculado el índice de pérdida (IP) de cada fase mineral en medio ácido:

$$IP_{\text{ácida}} = (\text{Fase en muestra original} - \text{Fase tras extracción}) / \text{Fase en muestra original}$$

Con estos datos y el porcentaje de extracción de los elementos traza se ha realizado la matriz de correlaciones de Pearson. Se pueden observar diferencias para cada elemento traza dependiendo de la composición mineralógica de cada muestra. No se ha incluido la hexahidrita, la akaganeita, la goldichita y los sulfatos hidratados de cinc en la matriz de correlación ya que al desaparecer en todas las muestras tras la extracción, su índice de pérdida es una constante.

	99%	95%	
% Zn	Cadmio (r=0,659) Hierro (r=0,545)	Arsénico (r=0,464) Manganeso (r=0,451)	Cobre (r=0,315) Calcita (r=0,570)
% Pb		Cadmio (r=0,416) Hierro (r=0,405) Filosilicatos (r=0,407)	Calcita (r=0,530) Dolomita (r=0,511)
% Cd		Hierro (r=0,416) Arsénico (r=0,422) Cuarzo (r=-0,401)	Calcita (r=0,605) Dolomita (r=0,611)
% Fe		Arsénico (r=0,431) Cobre (r=0,435) Manganeso (r=0,439)	
% As		Cobre (r=0,456)	
% Mn		Cobre (r=0,425)	

Tabla 10.28. Matriz de correlación de Pearson entre porcentajes de extracción del elemento e índice de pérdida de cada fase mineral

Los minerales silicatados (filosilicatos, cuarzo y feldespatos) al no experimentar una movilización específica en este medio, no presentan correlaciones positivas significativas con ningún elemento estudiado a excepción del plomo, que la presenta con los filosilicatos (Tabla 10.28). El cuarzo

experimenta un enriquecimiento relativo coincidiendo con la disolución de algunos elementos traza, de ahí, las correlaciones negativas con el cadmio.

La calcita y la dolomita, minerales atacables en este medio, experimentan una disminución en aquellas muestras que la contienen. Esto coincide con la movilización de cinc, plomo y cadmio, por lo que estos elementos traza estarán relacionados con esta fase.

Las jarositas son minerales que como se ha comentado se pueden atacar parcialmente (Lapakko, 2002) en medio ácido, dependiendo de la cristalinidad del mineral y de la presencia de fases cuya disolución implique una subida de pH como es el caso de los carbonatos (Tabla 10.28).

10.4.2. Extracción en medio complejante-reductor.

Con el fin de simular la movilización potencial ante un cambio de condiciones, en este caso, reductoras, se realizó la extracción con citrato-ditionito según la metodología propuesta por Mehra y Jackson (1960).

Los materiales estudiados pueden ser transportados a lugares en los que podrían estar sometidos a condiciones reductoras y complejantes o sedimentar en el mar.

Los cambios en las condiciones ambientales debidos a causas antrópicas o naturales influyen en el comportamiento de los elementos traza y en las fases mineralógicas a las que están asociados. Influencias extremas del pH, temperatura, potencial redox, materia orgánica, humedad, actividad microbiana, etc., pueden determinar unas condiciones anóxicas y reductoras modificando los equilibrios que afectan a los ligandos y provocando la formación de complejos con sustancias orgánicas de bajo peso molecular (Filgueiras et al., 2002).

Las condiciones de alteración que se dan en la zona de estudio provocan la presencia de minerales transformados con baja cristalinidad, con una composición química de transición y una red cristalina afectada superficialmente que facilita las reacciones redox para el hierro y el manganeso, con los consiguientes cambios estructurales en minerales como hidroxisulfatos y filosilicatos, que son afectados en mayor o menor medida dependiendo del grado de cristalinidad.

La extracción en un medio complejante-reductor con citrato-ditionito moviliza parcialmente a hematites y goethita, los óxidos de hierro no cristalinos y los complejos orgánicos de hierro y aluminio (Mehra y Jackson, 1960). También ataca algunas fases de manganeso. Este método es menos efectivo con las formas no cristalinas de aluminio y prácticamente no extrae el hierro y aluminio que forman parte de las fases silicatadas con alto grado de cristalinidad, por tanto nos permite evaluar el hierro libre, no silicatado (Mehra y Jackson, 1960).

Las fases no cristalinas de hierro y también las de manganeso retienen sobre sus superficies elementos traza, que en un principio se encuentran en forma intercambiable, pero que con el paso del tiempo pasan a ser mucho menos móviles (Ure y Davison, 2002). Este comportamiento frente al reactivo empleado permite prever la movilización de los elementos traza estudiados si los materiales se someten a hidromorfía y/o tiene lugar un aporte importante de materia orgánica.

10.4.2.1. Movilización de elementos traza en medio complejante reductor.

En las Tablas 10.29 a 10.33 se contemplan las concentraciones de hierro libre así como del resto de elementos traza, medidos tras la extracción con citrato-ditionito. Se muestran también los valores máximos, medios, mínimos y las desviaciones estándar para cada uno de ellos en las cinco zonas establecidas.

Como podemos observar, el hierro presenta concentraciones muy elevadas en todas las muestras, lo que pone de manifiesto la existencia de fases del elemento no cristalinas. La concentración media es de 32673 mg kg^{-1} , sin embargo, pese a que, en general, las concentraciones son elevadas en todas las muestras, las desviaciones estándar también lo son, por lo que existe elevada variabilidad entre las muestras.

En relación al resto de elementos traza considerados, son también muy elevadas las concentraciones de cinc, con un valor medio de 1756 mg kg^{-1} , seguido de manganeso (637 mg kg^{-1}), plomo (76 mg kg^{-1}) y arsénico (73 mg kg^{-1}). Cobre y cadmio no presentan concentraciones elevadas en este medio, siendo sus valores medios 13 y 9 mg kg^{-1} respectivamente. El contenido en mercurio está por debajo del límite de detección en todas las muestras.

ZONA A	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn
	mg/kg						
Máximo	6157	142	13	43683	87	17	1231
Media	2284	59	10	29586	57	12	651
Mínimo	37	11	1	1184	1	4	151
Desv Est	2143,9	36,3	3,8	12683,8	24,61	4,2	371,8

Tabla 10.29. Concentración de elementos traza tras la extracción con citrato-
dionito (Zona A)

ZONA B	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn
	mg/kg						
Máximo	3103	765	14	63401	143	29	1887
Media	1484	99	10	25252	43	14	1000
Mínimo	51	20	4	442	4	2	189
Desv Est	940,7	155,5	2,6	16851,7	38,19	6,9	507,9

Tabla 10.30. Concentración de elementos traza tras la extracción con citrato-
dionito (Zona B)

ZONA C	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn
	mg/kg						
Máximo	5599	99	14	47903	167	14	1467
Media	2693	50	11	31692	103	12	393
Mínimo	1276	11	6	19135	64	7	56
Desv Est	1385,0	30,4	2,6	10896,4	38,85	3,0	504,9

Tabla 10.31. Concentración de elementos traza tras la extracción con citrato-
dionito (Zona C)

ZONA D	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn
	mg/kg						
Máximo	3614	186	13	114429	221	22	2687
Media	1534	84	7	66153	131	12	505
Mínimo	431	16	3	15632	3	5	46
Desv Est	987,1	47,8	2,8	30065,8	57,31	5,0	637,4

Tabla 10.32. Concentración de elementos traza tras la extracción con citrato-
dionito (Zona D)

ZONA E	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn
	mg/kg						
Máximo	1806	276	11	14694	107	37	1026
Media	783	88	7	10682	31	17	635
Mínimo	32	11	2	4101	2	3	333
Desv Est	570,2	86,5	3,4	3657,1	35,55	8,6	212,4

Tabla 10.33. Concentración de elementos traza tras la extracción con citrato-ditionito (Zona E)

Al igual que en el resto de extracciones realizadas, se ha evaluado la movilización de los elementos traza en medio complejante-reductor, calculando los porcentajes de extracción de los mismos:

$$\text{Concentración extraído elemento (mg kg}^{-1}\text{) / Concentración total (mg kg}^{-1}\text{) x 100}$$

La Tabla 10.34 muestra los valores máximos, medios, mínimos y la desviación estándar de la fracción extraída con citrato-ditionito para los elementos traza estudiados y las Figuras 10.21 a 10.27 los porcentajes de extracción de cada elemento en las distintas zonas.

En general, la movilización de todos los elementos es elevada, excepto en el caso de plomo, arsénico y cobre para los que no se superan el 10% de extracción. Los metales que presentan un mayor movilización son cadmio (27,7%), hierro (23,7%), manganeso (23%) y cinc (21,6%).

	Zn (%)	Pb (%)	Cd (%)	Fe (%)	As (%)	Cu (%)	Mn (%)
Media	21,6	5,9	27,7	23,7	7,8	9,2	23,0
Mínimo	4,2	0,2	6,4	2,2	0,6	0,2	2,3
Máximo	44,6	44,3	45,8	47,1	45,1	60,2	92,2
Desv Est	11,5	11,1	10,2	13,4	8,9	11,8	17,6

Tabla 10.34. Fracción soluble (%) tras la extracción con citrato-ditionito

La movilización de cinc en las zonas A, B y D tiene valores similares, a excepción de los puntos A8, A10, A14 y A15 en la zona A, los sedimentos que se corresponden con suelos rojos (B18 a B21) en la zona B y los puntos D6 y D8 en el Gorguel, en los que los porcentajes son inferiores al resto.

Por otro lado, en las zonas del Cabezo Rajao y Portman (C y E), la extracción de cinc es menor que en las otras zonas (Figura 10.21).

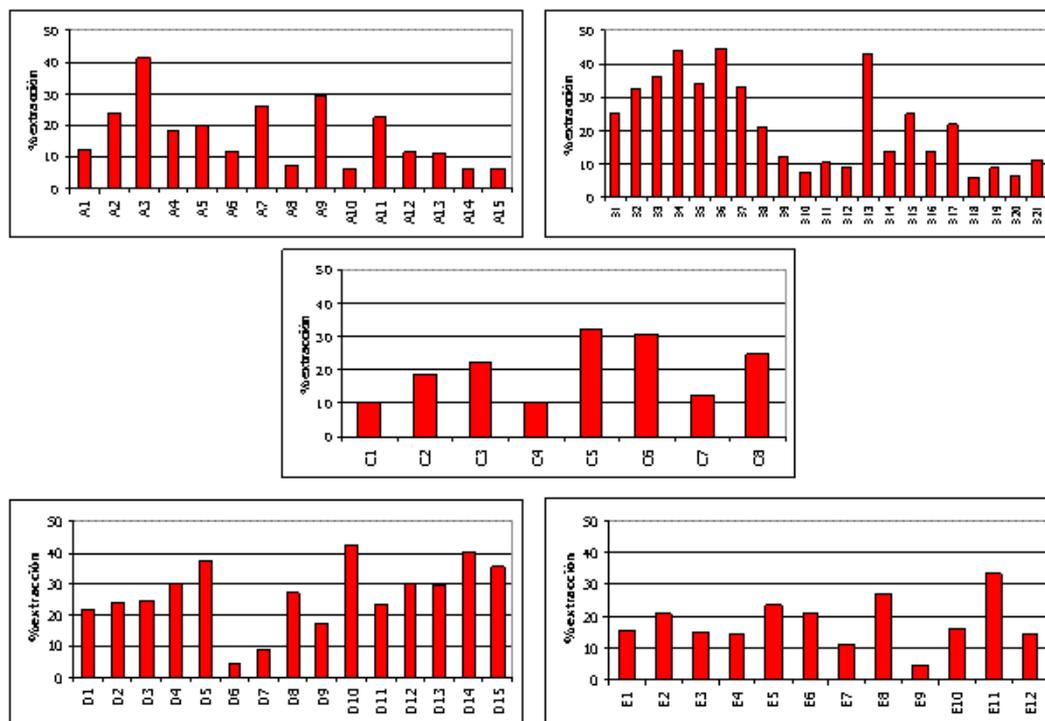


Figura 10.21. Porcentajes de extracción de Zn con citrato-ditionito

Los porcentajes de extracción de plomo son en general bajos, por lo que las fases que se ven alteradas con este extractante no lo contienen en su composición. De las cinco zonas, los mayores porcentajes de extracción se dan en Portman y Lo Poyo, así como en los suelos rojos del Llano del Beal, que presentan elevado contenido en óxidos de hierro y aluminio (Figura 10.22).

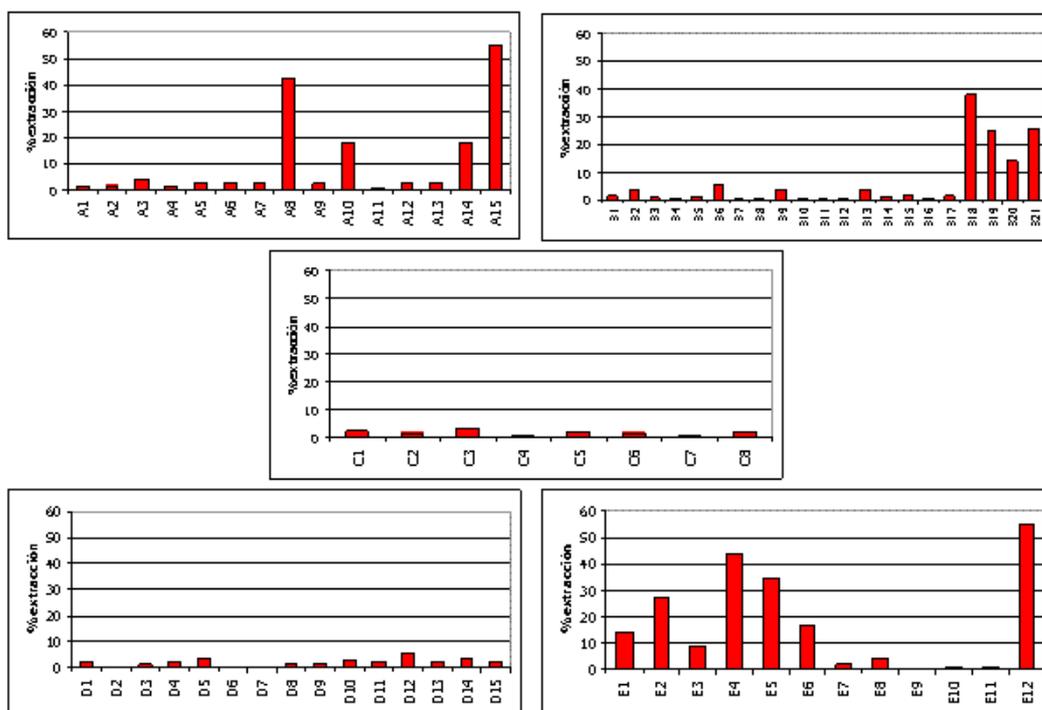


Figura 10.22. Porcentajes de extracción de Pb con citrato-ditionito

El cadmio presenta un comportamiento similar en los sedimentos de todas las zonas, con valores cercanos al 40% en la mayoría de ellos (Figura 10.23).

La zona en la que menos cadmio se moviliza por este método es la del Cabezo Rajao, en la que apenas se supera el 30% en algunos puntos.

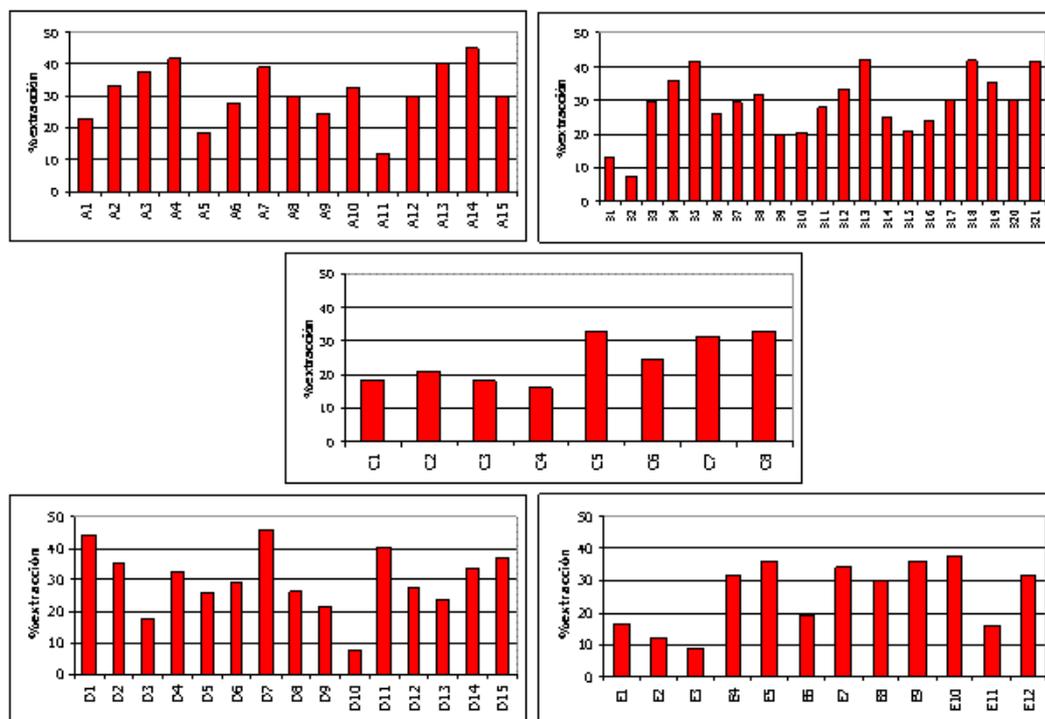


Figura 10.23. Porcentajes de extracción de Cd con citrato-ditionito

Los porcentajes de extracción de hierro son elevados en las zonas A, B, C y D, llegando en algunas muestras a extraerse el 50% del hierro total. Por el contrario, en Portman los porcentajes son menores, sobre todo en los puntos de la Bahía, ya que en estos sedimentos el hierro aparece como carbonato, no atacable con este método (Figura 10.24).

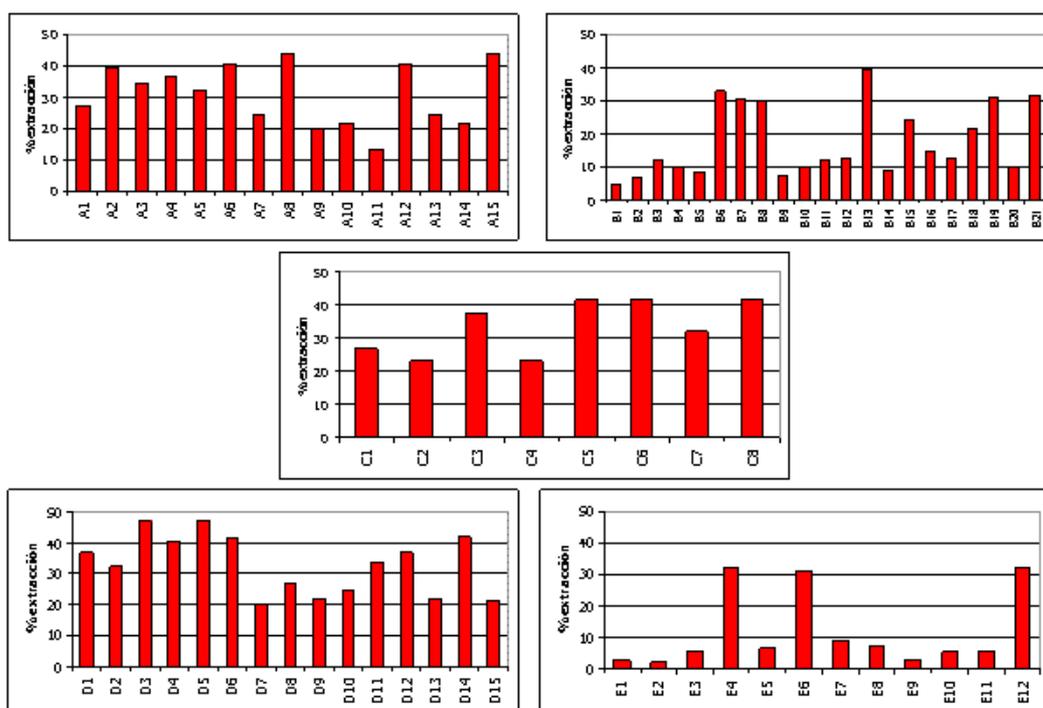


Figura 10.24. Porcentajes de extracción de Fe con citrato-ditionito

La extracción de arsénico es sensiblemente inferior al resto de elementos en las cinco zonas, a excepción de algunos puntos en los que se moviliza gran cantidad de este elemento (B13, B14) (Figura 10.25).

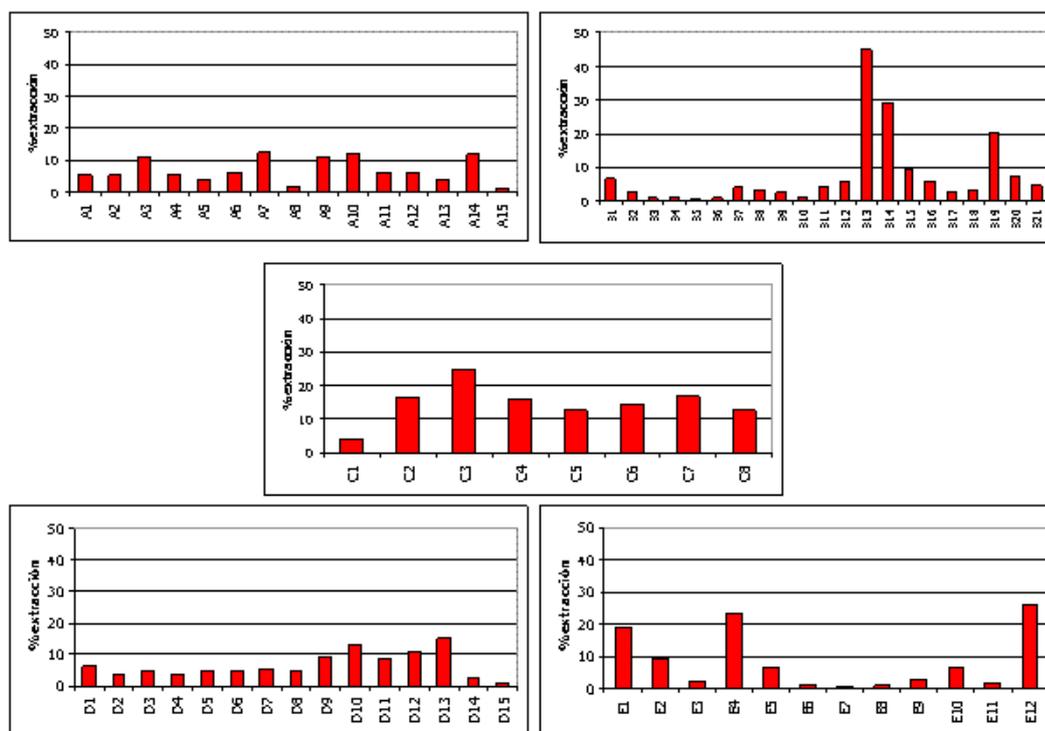


Figura 10.25. Porcentajes de extracción de As con citrato-ditionito

La movilización de cobre en Lo Poyo es elevada en los sedimentos A8 y A15, que se corresponden con sedimentos recogidos en la playa. También se da un elevado porcentaje de extracción en el punto B18, mientras que en el resto de sedimentos de las cinco zonas los valores son similares (Figura 10.26).

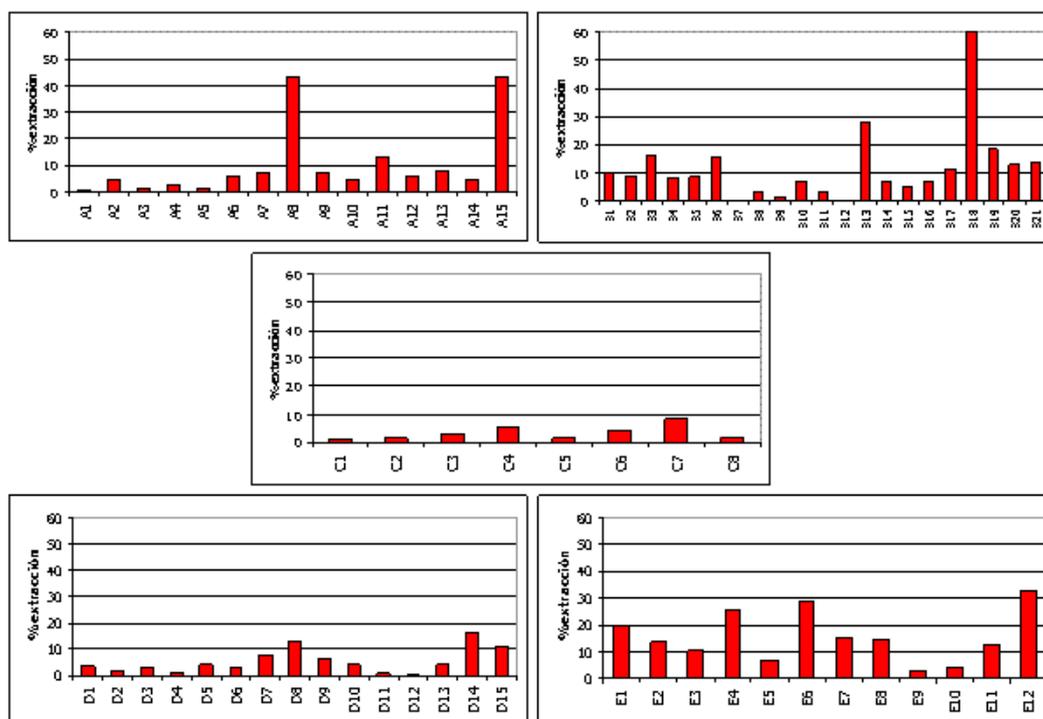


Figura 10.26. Porcentajes de extracción de Cu con citrato-ditionito

El comportamiento del manganeso también resulta muy homogéneo en las distintas zonas, dándose los valores mínimos en el Cabezo Rajao y en los sedimentos recogidos en la Bahía de Portman (Figura 10.27).

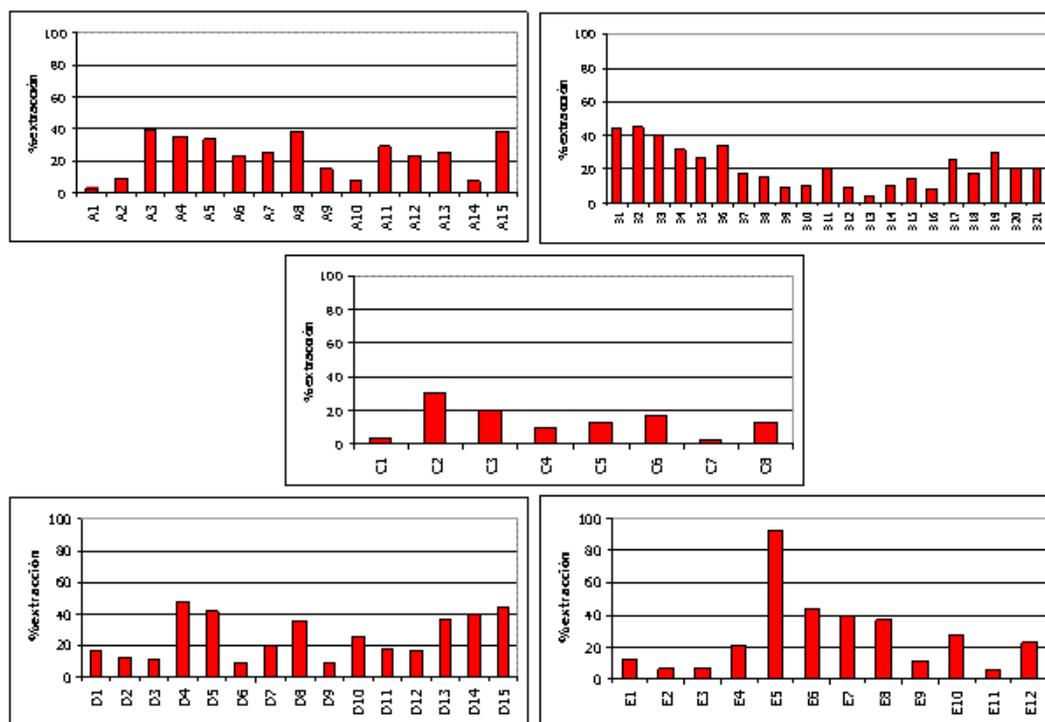


Figura 10.27. Porcentajes de extracción de Mn con citrato-ditionito

10.4.2.2. Estudio de la composición mineralógica tras la extracción en medio complejante-reductor.

En el estudio mineralógico efectuado tras el ataque con citrato-ditionito, las fases solubles se ven atacadas tras la extracción en este medio.

En la Figura 10.28 se observa como desaparece el yeso y los sulfatos hidratados en todas las muestras que los contienen. También desaparece totalmente la akaganeita y la alunita.

Las jarositas experimentan una disminución como consecuencia de la reducción del hierro, especialmente en aquellas muestras en las que el grado de cristalinidad del mineral es menor. Las jarositas, como minerales de Fe^{3+} son susceptibles de ser atacadas, produciéndose la reducción de Fe^{3+} a Fe^{2+} , provocando su disolución.

El resto de fases no se ven afectadas tras la extracción, o experimentan un incremento relativo debido a la desaparición o disminución que experimentan las otras fases presentes, como ya se ha comentado anteriormente.

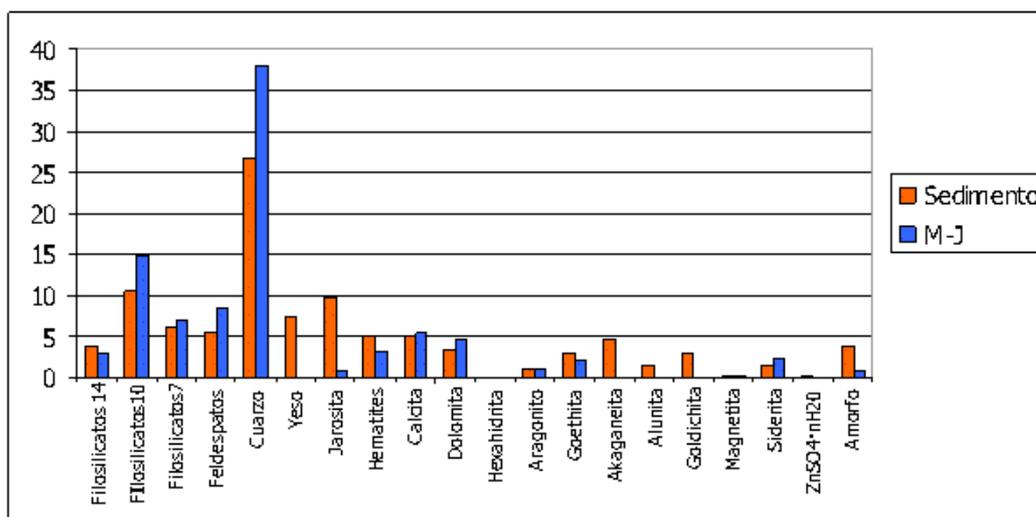


Figura 10.28. Composición mineralógica de las muestras originales y de los residuos tras la extracción con citrato-ditionito

10.4.2.3. Relación entre movilización de elementos traza y variación en la composición mineralógica en medio complejante-reductor.

La matriz de correlación de Pearson (Tabla 10.35) establece las relaciones ente la movilización de cada uno de los elementos traza y la variación que se produce en la composición mineralógica de las muestras tras la extracción con citrato-ditionito. Dicha variación se ha expresado como el índice de pérdida (IP) de cada fase mineral a partir de los datos mineralógicos obtenidos por Difracción de Rayos X en la muestra original y en el residuo tras la extracción tal y como se indica a continuación:

$$IP_M = (Fase\ en\ muestra\ original - Fase\ tras\ extracción) / Fase\ en\ muestra\ original$$

	99%		95%	
% Zn			Filo 10Å (r=-0,396) Filo 7Å (r=-0,382) Manganeso (r=0,364)	Calcita (r=-0,324) Magnetita (r=0,460)
% Pb	Siderita (r=0,641)	Cobre (r=0,685)	Calcita (r=0,387)	Magnetita (r=-0,403)
% Cd	Calcita (r=0,549) Alunita (r=0,318)	Magnetita (r=0,543)		
% Fe			Filo 10Å (r=-0,317) Feldespatos (r=-0,460)	Akaganeita (r=-0,372) Magnetita (r=-0,329)
% Cu	Magnetita (r=0,413)			
% Mn			Alunita (r=0,414)	Siderita (r=-0,304)

Tabla 10.35. Matriz de correlación de Pearson entre porcentajes de extracción de elementos traza e índice de pérdida de cada fase mineral

Los filosilicatos presentan correlaciones negativas con el cinc y hierro ya que dada la gran movilidad de estos metales en este medio, la disolución de fases que los contienen coincide con el aumento relativo que experimentan ellos. El hierro además aparece correlacionado con los feldespatos (Tabla 10.35).

La calcita también aparece positivamente correlacionada con el plomo y el cadmio y negativamente con el cinc.

La akaganeita, que se ve alterada en este medio, aparece negativamente correlacionada con el hierro, esto es, el aumento en hierro en el medio se debe a la desaparición de la akaganeita tras la extracción.

Lo mismo ocurre con la magnetita y el hierro, que presentan una elevada correlación negativa. Por otro lado, la magnetita aparece negativamente correlacionada con el plomo y positivamente con el cobre.

El cadmio y el manganeso también presentan una correlación positiva con la alunita.

Finalmente, el arsénico no aparece correlacionado con ninguna fase mineral tras la extracción.

10.4.3. Extracción en medio oxidante.

Para simular las etapas finales del proceso de alteración al que están sometidos los materiales estudiados en condiciones naturales, se realizó la extracción con acetato amónico 1M tras oxidar previamente las muestras con peróxido de hidrógeno 8,8M en medio ácido (Sutherland y Tack, 2002) siguiendo la metodología propuesta para la tercera etapa de la extracción secuencial desarrollada por el BCR (European Community Bureau of Reference) en la que se ven atacados la materia orgánica y los sulfuros (Sutherland y Tack, 2002). En estas condiciones, las jarositas mal cristalizadas también son atacadas debido a la acidez del medio, pero al aumentar después el pH, algunos elementos traza pueden precipitar, no siendo este el caso del plomo, que forma acetato de plomo soluble y debido a ello, se moviliza más que en medio ácido.

10.4.3.1. Movilización de elementos traza en medio oxidante.

En los extractos obtenidos se determinaron las concentraciones de elementos traza que se muestran en la Tablas 10.36 a 10.40, junto con los valores máximos, medios, mínimos y las desviaciones estándar para cada uno de ellos en las cinco zonas establecidas.

De todos los elementos traza, el hierro y el cinc presentan las mayores concentraciones, con un valor medio de 1383 y 1071 mg kg⁻¹ respectivamente. La desviación estándar es más alta en el caso del hierro debido a que existe más variabilidad en el contenido de hierro que de cinc en las muestras.

El manganeso presenta una concentración media de 745 mg kg⁻¹, seguida del plomo con 306 mg kg⁻¹, presentando ambos una desviación estándar elevada. Cobre y cadmio presentan concentraciones intermedias, 16 y 7 mg kg⁻¹, respectivamente; mientras que el arsénico es el que presenta la menor concentración, con valores medios de 4,2 mg kg⁻¹, por lo que podemos decir que en estas muestras y bajo las condiciones en que se encuentran, el arsénico se presentan en forma oxidada. El mercurio, como en las otras extracciones está por debajo del límite de detección.

ZONA A	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn
	mg/kg						
Máximo	4629	459	18	200	6	24	1658
Media	909	181	8	111	3	7	637
Mínimo	32	15	0,2	60	0,5	1	23
Desv Est	1363,3	136,9	5,5	45,3	1,84	6,0	462,9

Tabla 10.36. Concentración de elementos traza tras la extracción en medio oxidante (Zona A)

ZONA B	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn
	mg/kg						
Máximo	4072	1018	19	8268	20	29	5149
Media	755	264	7	549	3	5	1164
Mínimo	15	15	0,1	36	0,4	0,3	171
Desv Est	1050,8	315,4	5,6	1774,5	4,19	7,1	1136,6

Tabla 10.37. Concentración de elementos traza tras la extracción en medio oxidante (Zona B)

ZONA C	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn
	mg/kg						
Máximo	6983	1992	22	431	1,6	195	990
Media	2392	574	15	194	0,4	38	558
Mínimo	55	20	7,5	93	0,0001	4	84
Desv Est	2493,9	854,3	5,7	119,1	0,6	69,6	281,6

Tabla 10.38. Concentración de elementos traza tras la extracción en medio oxidante (Zona C)

ZONA D	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn
	mg/kg						
Máximo	2976	1845	10	2347	100,6	46	3243
Media	782	435	4	295	8,8	11	712
Mínimo	6	14	0,3	31	0,1	1	6
Desv Est	935,6	652,2	2,5	597,4	25,5	12,3	824,0

Tabla 10.39. Concentración de elementos traza tras la extracción en medio oxidante (Zona D)

ZONA E	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn
	mg/kg						
Máximo	1795	278	6	37393	23,6	57	1838
Media	519	77	3	5764	6,2	18	652
Mínimo	3	7	1,7	7	0,4	1	99
Desv Est	642,4	91,1	1,2	11724,2	8,7	19,7	562,8

Tabla 10.40. Concentración de elementos traza tras la extracción en medio oxidante (Zona E)

Se ha estudiado la movilización de los elementos traza en medio oxidante, mediante el cálculo de los porcentajes de extracción:

$$\text{Concentración extraída elemento (mg kg}^{-1}\text{) / Concentración total (mg kg}^{-1}\text{) x 100}$$

En las Figuras 10.29 a 10.35 se han representado dichos porcentajes para cada elemento en las cinco zonas establecidas y la Tabla 10.41 recoge los valores máximos, mínimo y medios de extracción junto con los valores de desviación estándar.

El manganeso y el cadmio son los metales que presentan la mayor movilización en medio oxidante, siendo su porcentaje de extracción en este medio del 25% para el manganeso y 22% para el cadmio. Le siguen el plomo (12,5%), el cinc (9,4%) y cobre (6,7%). Para el hierro y el arsénico la movilización es casi nula, siendo los valores medios de porcentaje de extracción 0,6 y 0,5%, respectivamente.

	Zn (%)	Pb (%)	Cd (%)	Fe (%)	As (%)	Cu (%)	Mn (%)
Media	9,4	12,5	22,3	0,6	0,5	6,7	25,3
Mínimo	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	1,3
Máximo	48,1	85,2	85,3	9,7	4,0	89,1	69,8
Desv Est	10,6	21,4	20,0	1,9	0,8	16,2	18,5

Tabla 10.41. Fracción soluble (%) tras la extracción en medio oxidante

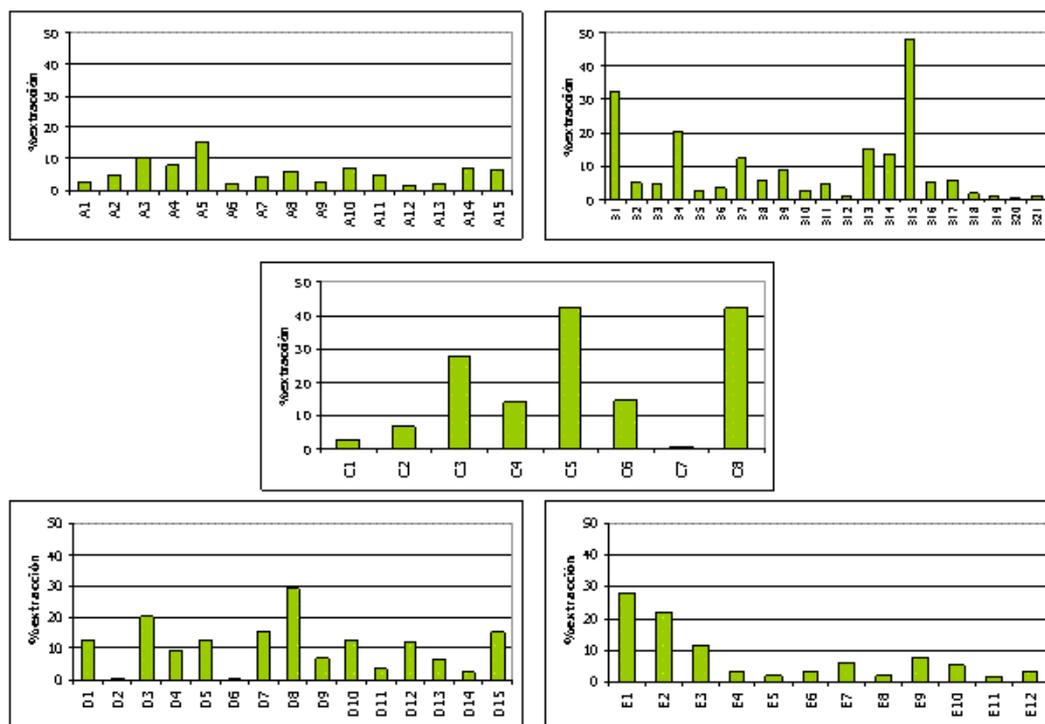


Figura 10.29. Porcentajes de extracción de Zn en medio oxidante

La menor movilización de cinc en este medio tiene lugar en la zona de Lo Poyo y Portman, a excepción de los sedimentos recogidos en la Bahía de Portman, en los que se alcanzan valores de hasta el 30%. El resto de sedimentos de las otras zonas presentan un comportamiento similar (Figura 10.29).

A excepción de algunos puntos, los porcentajes de extracción de plomo son similares en todos los sedimentos de las cinco zonas (Figura 10.30).

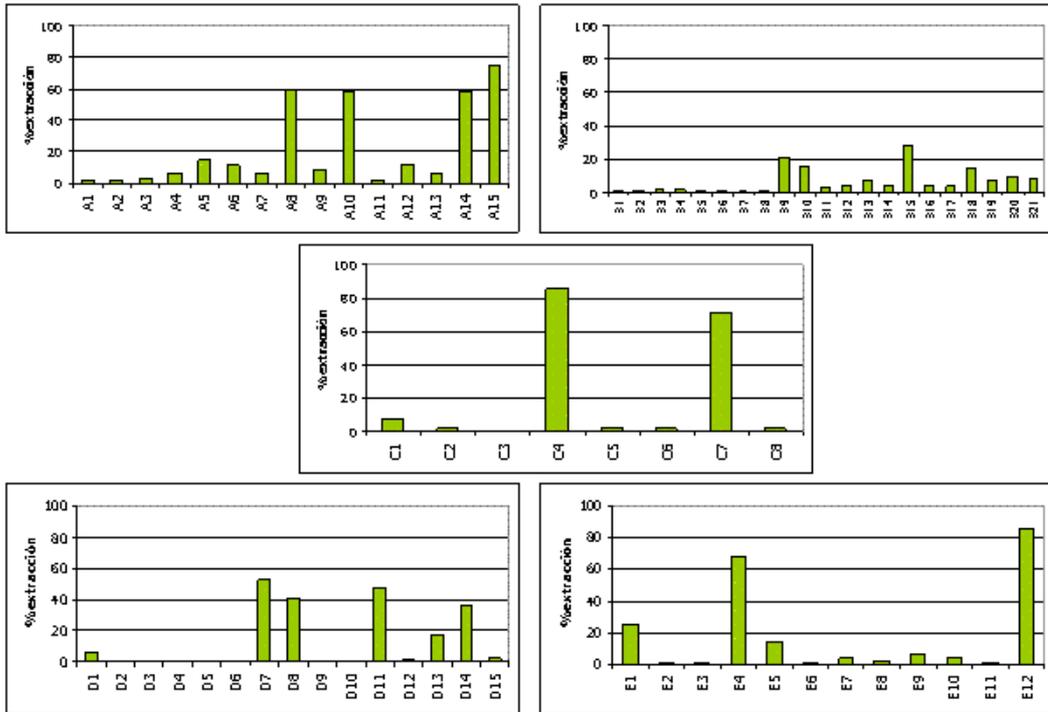


Figura 10.30. Porcentajes de extracción de Pb en medio oxidante

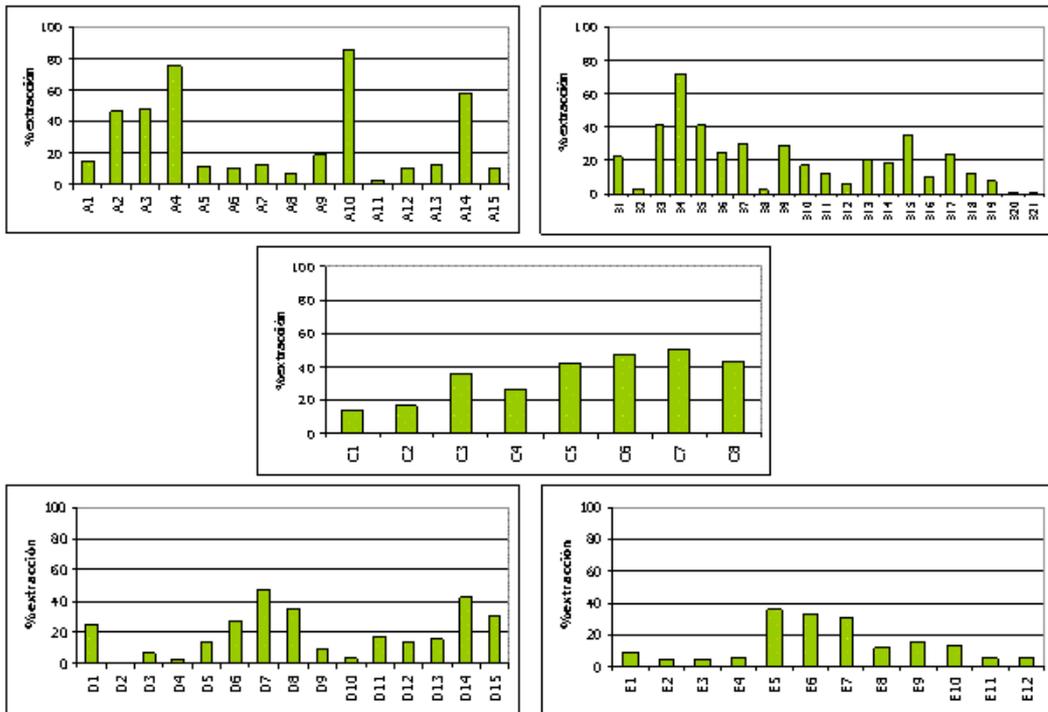


Figura 10.31. Porcentajes de extracción de Cd en medio oxidante

El cadmio y el manganeso se movilizan mucho en este medio, tanto ligados a jarositas mal cristalizadas como a carbonatos que pueden atacarse al tratarse

de una extracción con medio ácido (Figuras 10.30 y 10.35). Sin embargo, la movilización de hierro y arsénico es muy escasa en todas las zonas, únicamente siendo representativo en sedimentos en los que aparecen ligados a la siderita (E1, E2 y E3) (Figuras 10.32 y 10.33).

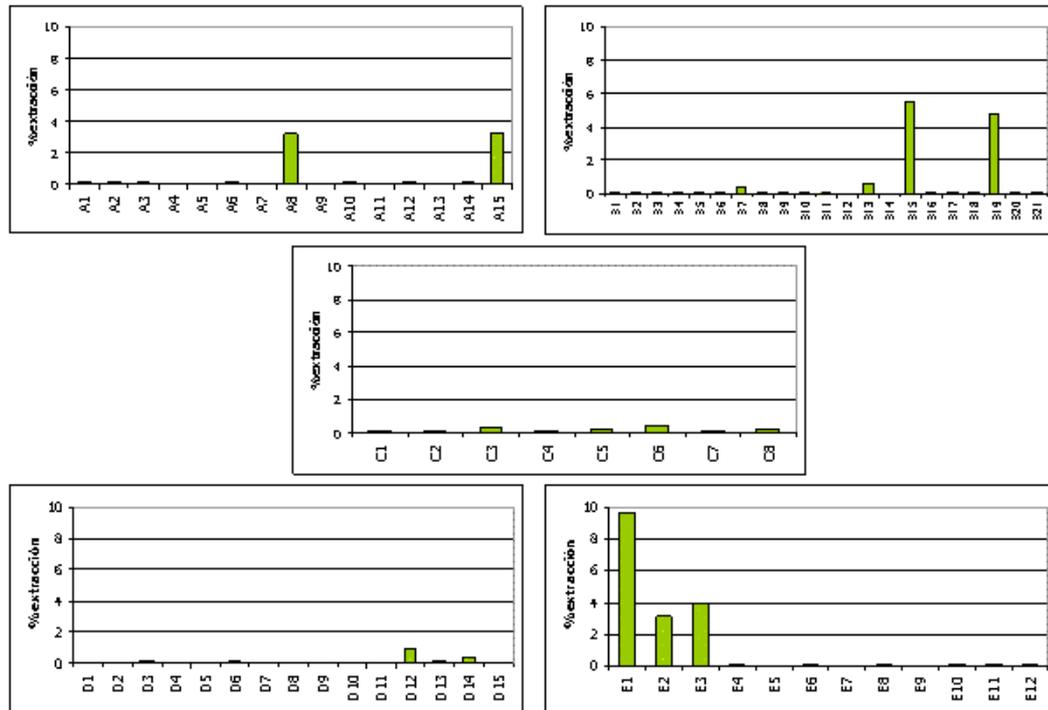


Figura 10.32. Porcentajes de extracción de Fe en medio oxidante

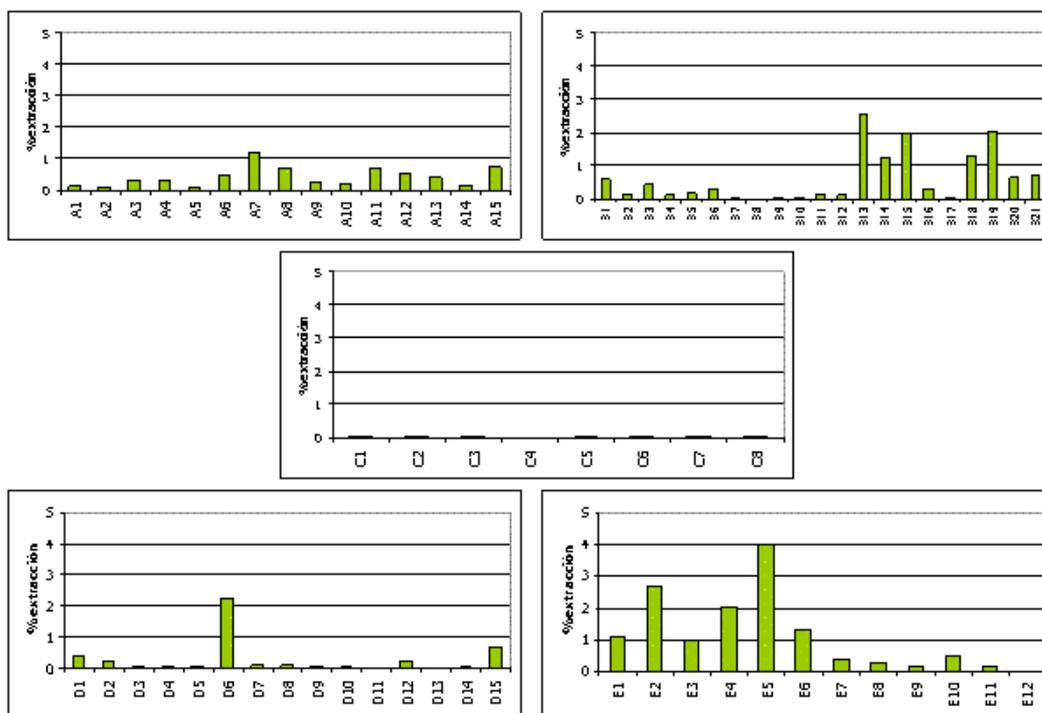


Figura 10.33. Porcentajes de extracción de As en medio oxidante

Finalmente, y para el caso del cobre, es de destacar los porcentajes de extracción de los sedimentos A8 y A15, mucho más elevados que el resto, y los sedimentos E1 y E9, de la zona de Portman (Figura 10.34).

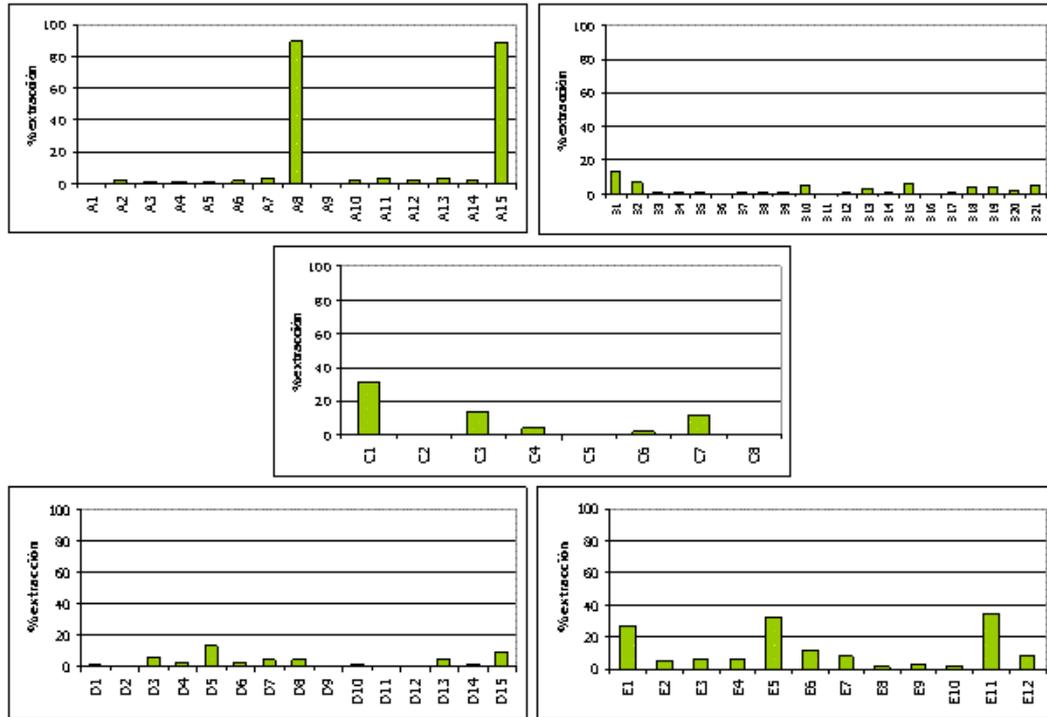


Figura 10.34. Porcentajes de extracción de Cu en medio oxidante

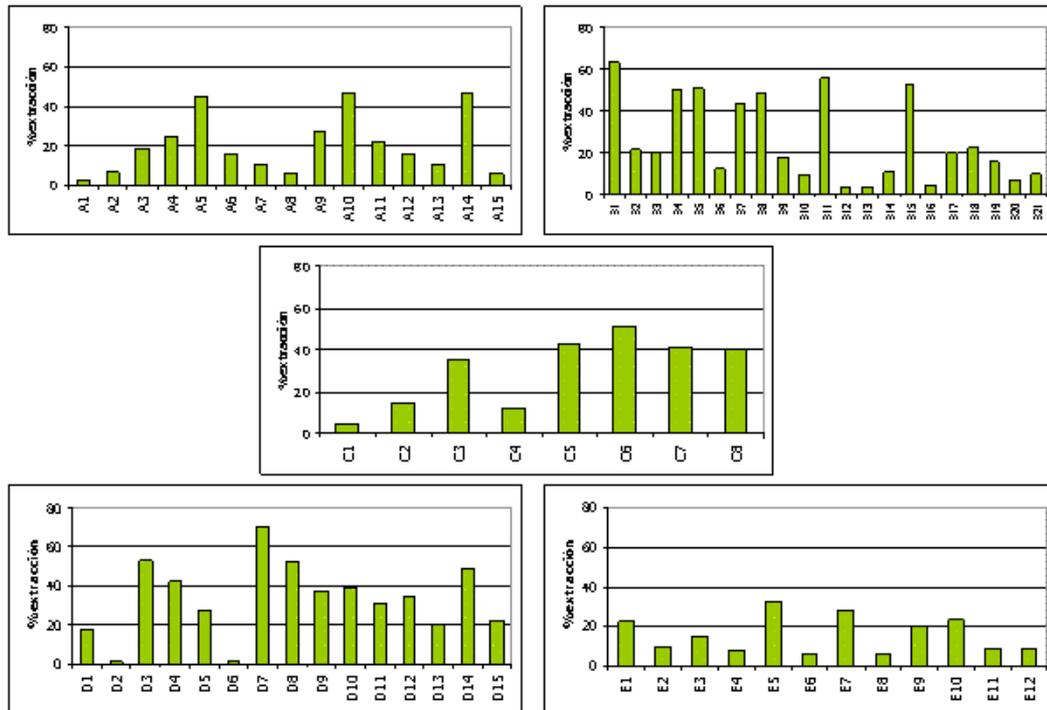


Figura 10.35. Porcentajes de extracción de Mn en medio oxidante

10.4.3.2. Estudio de la composición mineralógica tras la extracción en medio oxidante.

La composición mineralógica de los residuos (Figura 10.36) tras la extracción muestra que al igual que en el resto de las extracciones, las fases más solubles (yeso y sulfatos hidratados) desaparecen.

Los carbonatos, especialmente la calcita, se ven ligeramente alterados, así como las jarositas se ven parcialmente afectadas en este medio. El resto de minerales no se ven afectados por la extracción, e incluso aumentan parcialmente al desaparecer las fases solubles.

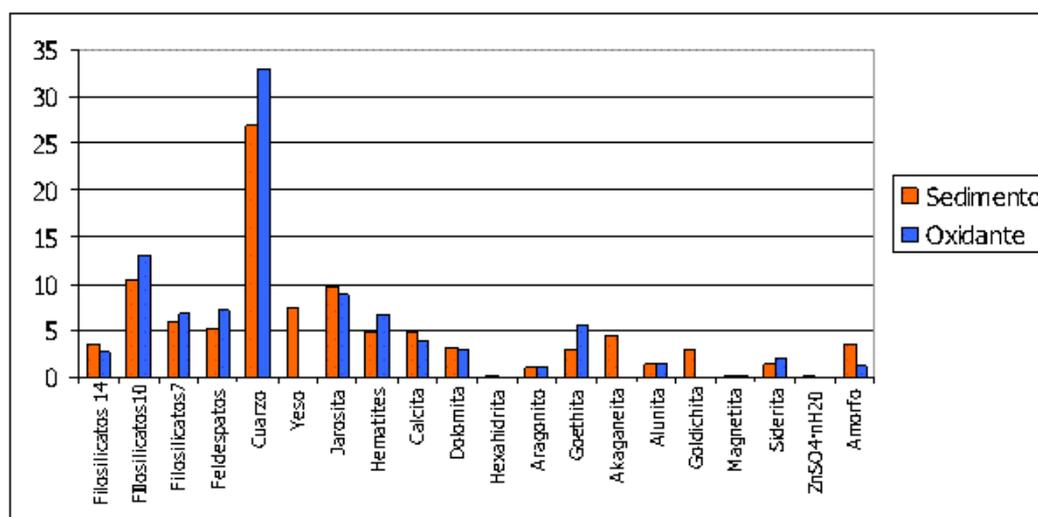


Figura 10.36. Composición mineralógica de las muestras originales y de los residuos tras la extracción en medio oxidante

10.4.3.3. Relación entre movilización de elementos traza y variación en la composición mineralógica en medio oxidante.

Se ha calculado el índice de pérdida de cada fase mineral (IP) a partir de los datos mineralógicos obtenidos por Difracción de Rayos X en la muestra original y en el residuo tras la extracción:

$$IP_{ox} = (Fase\ en\ muestra\ original - Fase\ tras\ extracción) / Fase\ en\ muestra\ original$$

Con los valores de dichos índices y los porcentajes de extracción de metal se ha realizado la matriz de correlación de Pearson con el fin de evaluar el comportamiento de cada metal con respecto a la mineralogía (Tabla 10.42).

	99%	95%	
% Zn	Manganeso (r=0,511)	Hierro (r=0,323) Cuarzo (r=-0,496) Jarosita (r=-0,356)	Calcita (r=0,423) Siderita (r=-0,402)
% Pb		Alunita (r=-0,315)	Siderita (r=-0,426)
% Cd		Manganeso (r=0,390)	Calcita (r=0,432)
% Fe	Siderita (r=-0,588)	Cobre (r=0,322)	
% As	Feldespatos (r=0,325)		
% Cu		Hematites (r=0,350)	Alunita (r=-0,304)
% Mn	Siderita (r=-0,760)	Calcita (r=0,358)	Alunita (r=-0,447)

Tabla 10.42. Matriz de correlación de Pearson entre porcentajes de extracción de elementos traza e índice de pérdida de cada fase mineral

Debido a la ausencia de sulfuros y de materia orgánica, los resultados obtenidos son similares a los de la extracción ácida.

La movilización de cinc está asociada en este medio a la de hierro y manganeso, la de manganeso también está asociada a la de cadmio y la de hierro a la de cobre.

El cinc aparece negativamente correlacionado con el cuarzo y con los materiales carbonatados, concretamente con la siderita. Además, está correlacionado con las jarositas, productos de oxidación inmediatos de los sulfuros. El cinc, el cadmio y el manganeso aparecen positivamente correlacionados con la calcita.

El cobre, el manganeso y el plomo están relacionados negativamente con la alunita y además el manganeso y el plomo negativamente correlacionados con la siderita. Por último, el cobre está positivamente correlacionado con el hematites (Tabla 10.42).



**11. TRANSFERENCIA DE ELEMENTOS TRAZA A
RECEPTORES VIVOS**

11.1. Introducción.

A la hora de estudiar sedimentos contaminados con elementos traza es importante determinar la disponibilidad de éstos en los organismos vivos, que depende tanto del organismo como de factores abióticos, que determinan la forma en la que aparece el contaminante en el medio (Figura 11.1).

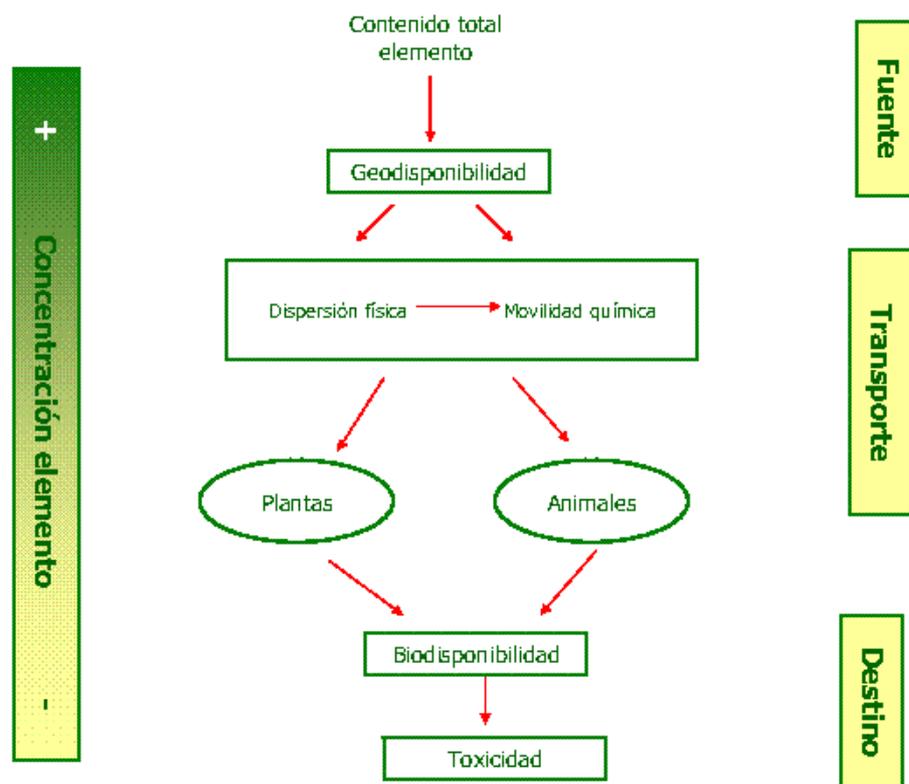


Figura 11.1. Patrones y relaciones entre los contenidos totales de elementos traza en residuos mineros y la toxicidad en los organismos

Se define **biodisponibilidad** como el grado en el que un contaminante, en una fuente potencial, puede ser incorporado a un organismo vivo. Esta biodisponibilidad depende de la geodisponibilidad, de la dispersión física y la movilización química, aunque también de la especificidad biológica y la susceptibilidad del organismo (Newman and Jagoe, 1994).

El término geodisponibilidad define el porcentaje del contenido total de un elemento que puede ser liberado a la superficie o en zonas cercanas a ella, ya sea por procesos mecánicos, químicos o biológicos (Filipek and Plumlee, 1999).

Existen gran cantidad de factores que afectan a la concentración de elementos geodisponibles, incluyendo las características del material (contenido total del elemento, tamaño de partícula, textura, estructura, pH y formas mineralógicas), el clima y el relieve. El término dispersión física engloba procesos físicos que facilitan la movilización de los elementos traza, mientras que la movilidad química incluye interacciones químicas con el suelo o con las aguas de escorrentía (Figura 11.1).

La biodisponibilidad es un requisito previo para la toxicidad, pero no siempre la biodisponibilidad provoca toxicidad, ya que la toxicidad implica un efecto nocivo sobre un organismo y estos efectos varían según la especie y con los diferentes genotipos dentro de la misma especie.

Para evaluar la biodisponibilidad de los contaminantes en el suelo se han desarrollado una serie de métodos, desde técnicas de extracción química hasta ensayos con microorganismos, invertebrados, anfibios, plantas y organismos superiores, en los que se determina la respuesta de éstos frente a sustancias tóxicas, la inhibición de la actividad enzimática, los cambios en la población microbiana, los índices de mortalidad, las malformaciones o su acumulación en determinados órganos o en el torrente sanguíneo (Gérard et al., 2001).

A la hora de aplicar estos métodos, es aconsejable incluir organismos de diferentes niveles tróficos, y además tanto biota acuática como terrestre, para minimizar las incertidumbres en la evaluación de la calidad de los sedimentos y porque, de esta manera, se obtiene una información más detallada de la toxicidad potencial de los mismos (Chapman et al., 2002; Davoren et al., 2005).

Para realizar la evaluación de la toxicidad en la zona de estudio se han elegido los siguientes organismos:

- Bacterias: la bacteria marina *Vibrio fischeri* fue seleccionada para evaluar la toxicidad aguda de las muestras de agua y las aguas de poro.
- Las plantas son componentes esenciales a la hora de identificar la magnitud de la toxicidad, ya que actúan como productores primarios (Chung et al., 2007; Schowanek et al., 2004). Para este estudio se han

seleccionado las especies *Sorghum saccharatum* (Sorgo), *Lepidium sativum* (Mastuerzo) y *Sinapis alba* (Mostaza blanca), frecuentemente utilizadas en bioensayos de toxicidad con plantas.

- El crustáceo bentónico *Heterocypris incongruens* fue seleccionado como especie representativa de herbívoro invertebrado (Chial Belgis et al., 2003).

La selección de estas especies se ha hecho con el fin de determinar la toxicidad en los tres escalones de la cadena trófica: productores, consumidores y descomponedores.

11.2. Bioensayo Microtox®.

El bioensayo Microtox® es desde 1984 una de las pruebas recomendadas por la EPA (Environmental Protection Agency), junto con pruebas en dáfnidos para la evaluación de la toxicidad de muestras ambientales, tanto de agua como sedimentos, suelos y sus extractos acuosos (Onorati y Mecozzi, 2004). Emplea la bacteria marina *Vibrio fischeri* y determina la toxicidad aguda de muestras medioambientales y compuestos puros basándose en la reducción de la bioluminiscencia natural de la bacteria en presencia de agentes contaminantes (Boluda et al., 2002).

11.2.1. Aguas superficiales.

La Figura 11.2 muestra los resultados del bioensayo Microtox® aplicado a las aguas superficiales en las diferentes zonas establecidas en el área de estudio.

En ella se observa como en la zona A (Lo Poyo) únicamente una muestra produjo efectos tóxicos para el organismo de este ensayo, la A9, que es una de las muestras afectada por contaminación primaria, influida tanto por balsas de la Sierra Minera como por la balsa de estériles de flotación de Lo Poyo. La mortalidad de *V. fischeri* en la muestra A9 es debida tanto a la presencia de elementos traza solubles como a su acidez.

El resto de muestras de agua no fueron tóxicas para este test.

Esta zona de estudio presenta influencia marina en parte de las muestras, siendo éste el hábitat natural de *Vibrio fischeri*, por lo que la tolerancia de la bacteria a la presencia de sales disminuye la sensibilidad de este bioensayo en esta zona. Por esta razón, la aplicación de este ensayo no permite evaluar la toxicidad por elementos traza en áreas costeras, por lo que no es recomendable utilizar un solo bioensayo para evaluar la toxicidad (García-Lorenzo et al., 2009).

En las zonas B, C y D todas las muestras mostraron toxicidad para *Vibrio fischeri*. De las tres, la zona C es la que presenta el valor medio más elevado de toxicidad, que se corresponde con valores bajos de EC_{50} . Los valores promedio para estas zonas fueron 5,7% para la zona B, 1,5% para la zona C y 3,6% para la zona D.

En la zona E sólo una muestra mostró sensibilidad para este bioensayo, la E11 con un valor de EC_{50} de 9,8%, que es un agua recogida en un punto de vertido directo.

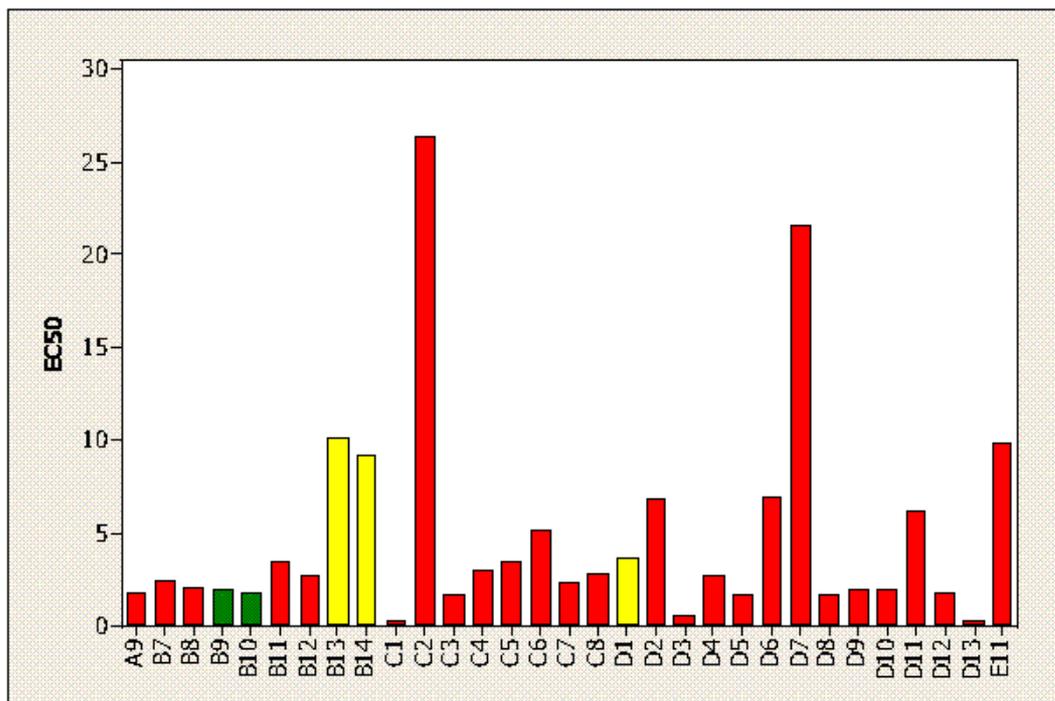


Figura 11.2. Resultados del bioensayo Microtox® en las aguas de escorrentía (rojo) cont. primaria; (amarillo) cont. secundaria; (verde) cont. terciaria

En la zona B, las muestras muy afectadas por los focos (B7, B8, B11 y B12) son muy tóxicas para la bacteria, porque tienen elevada concentración de

elementos traza solubles y pH ácido. Además, las aguas de los puntos B9 y B10, cuyos sedimentos se consideraron afectados por contaminación terciaria por aparecer mezclados con filitas y carbonatos, presentan una toxicidad elevada, ya que como se ha comentado en el capítulo dedicado a las aguas de escorrentía, en este caso, su proximidad a la fuente contaminante hace que sus características sean similares a las aguas afectadas por contaminación primaria e incluso presentan igual o mayor concentración de elementos traza solubles que las clasificadas como afectadas por contaminación primaria. Finalmente, las aguas procedentes de los puntos B13 y B14 resultaron menos tóxicas para *V. fischeri*.

En el Cabezo Rajao (Zona C), todas las muestras, afectadas por contaminación primaria, mostraron bajos valores de EC_{50} , a excepción de la C2, en la que el pH neutro favorece la precipitación de metales solubles, disminuyendo así la toxicidad.

En la zona del Gorguel todas las muestras fueron sensibles a este bioensayo, coincidiendo los valores de toxicidad con los mayores contenidos en elementos traza solubles (D3, D8, D9 y D13). Destaca que el agua recogida en el punto D7 tiene un valor de EC_{50} superior al resto de la zona, debido a que el pH de esta muestra es superior al del resto, por lo que es menos tóxica para este organismo.

En la zona de Portman (E), únicamente el agua recogida en el punto fue tóxica para la bacteria, ya que como se ha comentado, se sitúa en un punto de vertido directo (Figura 11.2).

El análisis de correlaciones entre la toxicidad en *V. fischeri* y la concentración de elementos traza en las aguas, muestra como la EC_{50} está positivamente correlacionada con el pH y con los carbonatos ($r=0,788$ y $r=0,639$ respectivamente). Valores elevados de pH se corresponden con muestras en las que los elementos traza han precipitado, de manera que no están disponibles para la bacteria.

Las correlaciones entre la EC_{50} , los cloruros ($r=0,445$) y el sodio ($r=0,480$) se deben a que *Vibrio fischeri* es una bacteria de ambientes marinos, como se ha comentado anteriormente.

Con respecto al contenido en elementos traza, la EC_{50} aparece negativamente correlacionada con el plomo y el arsénico soluble en las muestras,

esto es, valores elevados de estos elementos, aumentan la mortalidad bacteriana (Tabla 11.1).

	99%		95%	
EC₅₀	pH (r=0,780)	CO ₃ ²⁻ (r=0,639)	Cl (r=0,445)	Na ⁺ (r=0,480)
			Pb (r=-0,426)	As (r=-0,502)

Tabla 11.1. Matriz de correlación de Pearson para el bioensayo Microtox®, el contenido en elementos traza y las características generales de las aguas de escorrentía

11.2.2. Aguas de poro.

La Figura 11.3 muestra los resultados del bioensayo Microtox® aplicado a las muestras de agua de poro.

La bacteria no fue sensible a ninguna de las muestras de la zona A, y únicamente lo fue para dos muestras de agua de poro de la zona E, la E3 y E11, con valores de EC₅₀ de 8,5% y 11,7% respectivamente, coincidiendo con los puntos afectados por contaminación primaria.

En la zona B todas las muestras de agua a excepción de dos (B13 y B14) mostraron toxicidad para este ensayo. Las afectadas por contaminación primaria (B7, B8, B11 y B12) mostraron los valores más bajos de EC₅₀ de la zona, seguidos de las aguas B9, B10, afectadas por contaminación terciaria.

En aguas del Cabezo Rajao y el Gorguel, los resultados son similares a los obtenidos en las aguas: toxicidad elevada en las aguas de poro más cercanas a los focos a excepción de la C2, en la que el pH neutro disminuye el contenido en elementos traza en la solución.

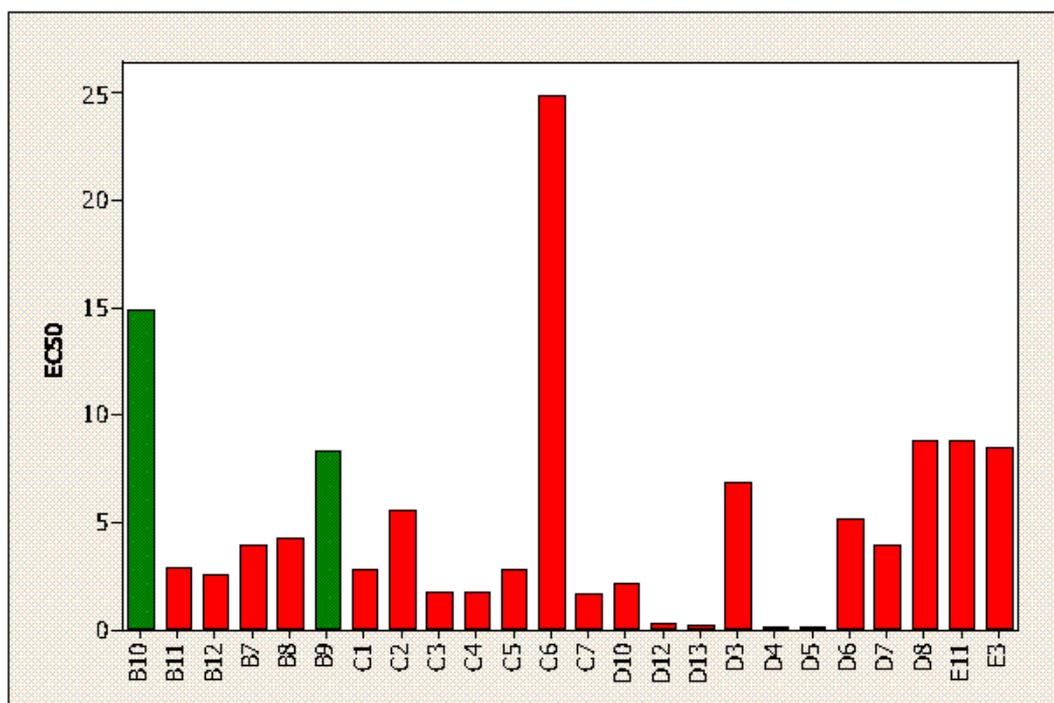


Figura 11.3. Resultados del bioensayo Microtox® en las aguas de poro (rojo) cont. primaria; (amarillo) cont. secundaria; (verde) cont. terciaria; (azul) origen diferente

El análisis de correlaciones muestra que la EC_{50} , al igual que en las aguas de escorrentía, está positivamente correlacionada con el pH y con el contenido en sodio y los cloruros. Además, también es elevada la correlación negativa entre la EC_{50} y la conductividad eléctrica ($r=-0,565$).

En cuanto a las correlaciones con el contenido en elementos traza, la EC_{50} está negativamente correlacionada con el arsénico ($r=-0,446$), el plomo ($r=-0,405$) y el aluminio ($r=-0,448$) (Tabla 11.2).

	99%		95%	
EC₅₀	pH ($r=0,572$)	CO ₃ ²⁻ ($r=0,639$)	Cl ($r=0,420$)	Na ⁺ ($r=0,425$)
	CE ($r=-0,565$)		Pb ($r=-0,405$)	As ($r=-0,446$)
			Al ($r=-0,448$)	

Tabla 11.2. Matriz de correlación de Pearson para el bioensayo Microtox®, el contenido en elementos traza y las características generales de las aguas de poro

11.3. Bioensayo de fitotoxicidad.

El bioensayo de fitotoxicidad Phytotoxkit® se realizó en las muestras de sedimentos y para las tres especies seleccionadas (*Sinapis alba*, *Sorghum saccharatum* y *Lepidium sativum*). Para todos los casos el ensayo se realizó por triplicado y con un suelo control.

11.3.1. Zona A- Lo Poyo.

En las Figuras 11.4, 11.5 y 11.6 se muestran las imágenes tomadas tras realizar el bioensayo en la zona A. Se ha tomado como ejemplo una muestra afectada por contaminación primaria (A4), otra por contaminación secundaria (A10) y otra por contaminación terciaria (A3).

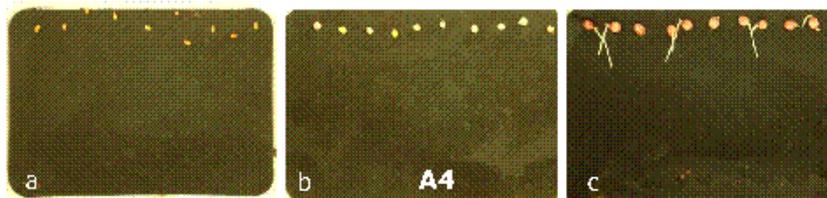


Figura 11.4. Resultados del bioensayo en una muestra afectada por contaminación primaria

a: *Lepidium sativum*. b: *Sinapis alba*. c: *Sorghum saccharatum*

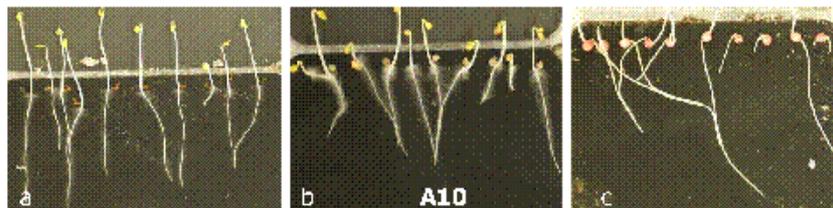


Figura 11.5. Resultados del bioensayo en una muestra afectada por contaminación secundaria

a: *Lepidium sativum*. b: *Sinapis alba*. c: *Sorghum saccharatum*

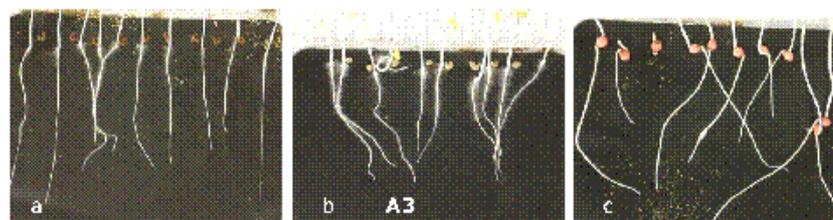


Figura 11.6. Resultados del bioensayo en una muestra afectada por contaminación terciaria

a: *Lepidium sativum*. b: *Sinapis alba*. c: *Sorghum saccharatum*

La Tabla 11.3 recoge los resultados del bioensayo en esta zona. En ella se observa que el porcentaje medio de inhibición de la germinación fue del 20% para *S. saccharatum* y del 30% para *L. sativum* y *S. alba*.

Una vez determinado el porcentaje de inhibición de la germinación, se estimó el porcentaje medio de inhibición del crecimiento, con valores medios del 35% en *S. saccharatum*, 30% en *S. alba* y 8% en *L. sativum*.

	Media	Máximo	Mínimo
<i>S. saccharatum</i>			
Inhibición germinación	20	100	0
Inhibición crecimiento	35	100	0
<i>L. sativum</i>			
Inhibición germinación	30	100	0
Inhibición crecimiento	8	100	0
<i>S. alba</i>			
Inhibición germinación	30	100	0
Inhibición crecimiento	36	100	0

Tabla 11.3. Resultados del bioensayo Phytotoxkit en la zona A

En la Figura 11.7 se muestran los resultados de este bioensayo para cada una de las muestras de la zona A. En ella se aprecia como los valores más elevados de inhibición de la germinación y del crecimiento de las raíces se da en las muestras A4, A5 y A9, afectados por contaminación primaria.

Por el contrario, los sedimentos A1, A2 y A3, en los que ha tenido lugar una atenuación de la contaminación por mezcla con material carbonatado (contaminación terciaria), presentan los menores porcentajes de inhibición junto con los sedimentos recogidos en la playa (A8 y A15).

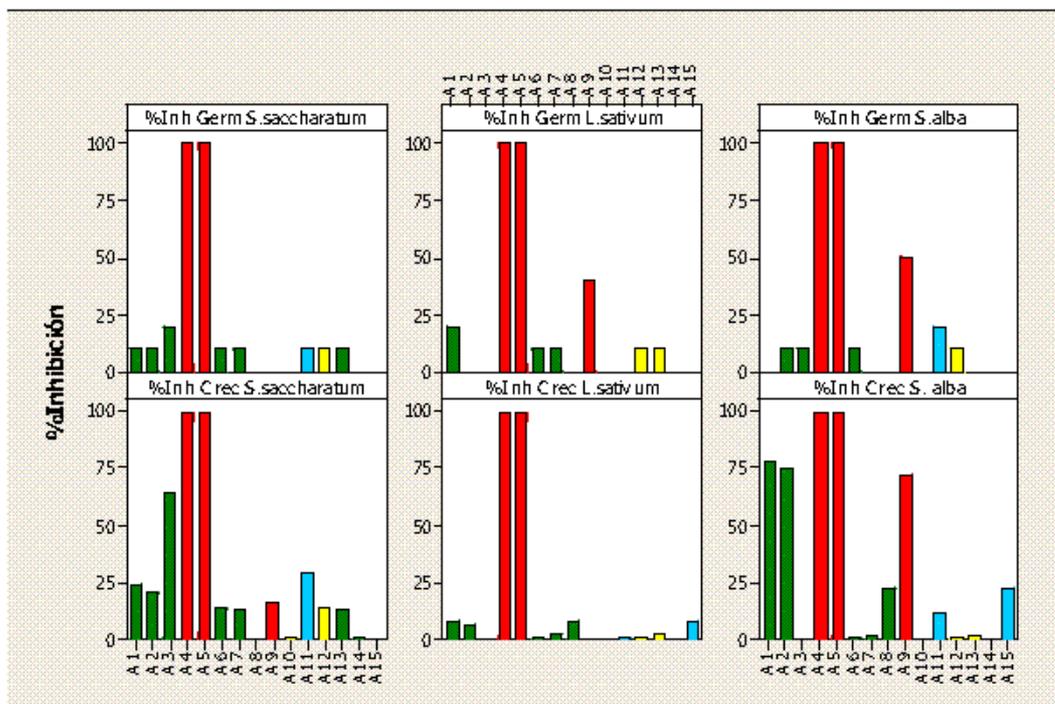


Figura 11.7. Resultados del bioensayo en las muestras de la zona A (rojo) cont. primaria; (amarillo) cont. secundaria; (verde) cont. terciaria; (azul) origen diferente

11.3.2. Zona B- Llano del Beal.

En las Figuras 11.8, 11.9 y 11.10 se muestran las imágenes tomadas tras realizar el bioensayo en la zona B. Se muestra como ejemplo una muestra afectada por contaminación primaria (B7), otra por contaminación secundaria (B2) y otra por contaminación terciaria (B17).

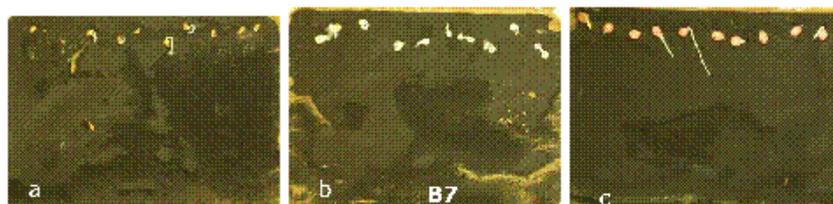


Figura 11.8. Resultados del bioensayo en una muestra afectada por contaminación primaria

a: *Lepidium sativum*. b: *Sinapis alba*. c: *Sorghum saccharatum*

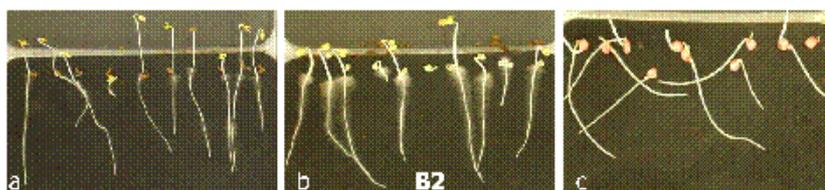


Figura 11.9. Resultados del bioensayo en una muestra afectada por contaminación secundaria

a: *Lepidium sativum*. b: *Sinapis alba*. c: *Sorghum saccharatum*

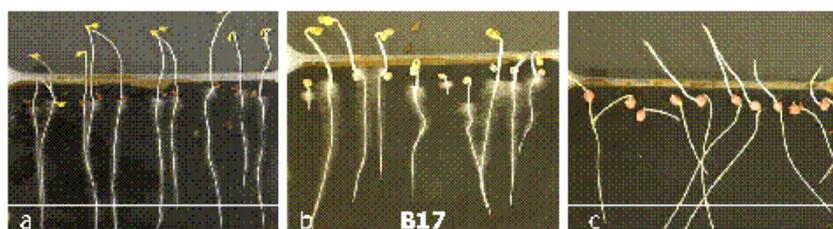


Figura 11.10. Resultados del bioensayo en una muestra afectada por contaminación terciaria

a: *Lepidium sativum*. b: *Sinapis alba*. c: *Sorghum saccharatum*

La Tabla 11.4 recoge los resultados del ensayo en la zona del Llano del Beal. En ella se observa que el porcentaje medio de inhibición de la germinación fue del 20% para *S. alba* y del 10% para *L. sativum* y *S. saccharatum*. El porcentaje medio de inhibición del crecimiento presenta valores medios del 26% en *S. saccharatum*, 28% en *S. alba* y 18% en *L. sativum*.

	Media	Máximo	Mínimo
<i>S. saccharatum</i>			
Inhibición germinación	10	100	20
Inhibición crecimiento	26	70	0
<i>L. sativum</i>			
Inhibición germinación	10	100	0
Inhibición crecimiento	18	100	0
<i>S. alba</i>			
Inhibición germinación	20	100	0
Inhibición crecimiento	28	100	1

Tabla 11.4. Resultados del bioensayo Phytotoxkit en la zona B

Los resultados de este bioensayo para cada sedimento en la zona B vienen recogidos en la Figura 11.11 y destaca como las muestras más cercanas a los focos (B1, B7, B8, B11 y B12), son las más tóxicas para las especies seleccionadas, así como los puntos de muestreo que se corresponden con los sedimentos afectados por contaminación terciaria presentan los menores porcentajes de inhibición vegetal.

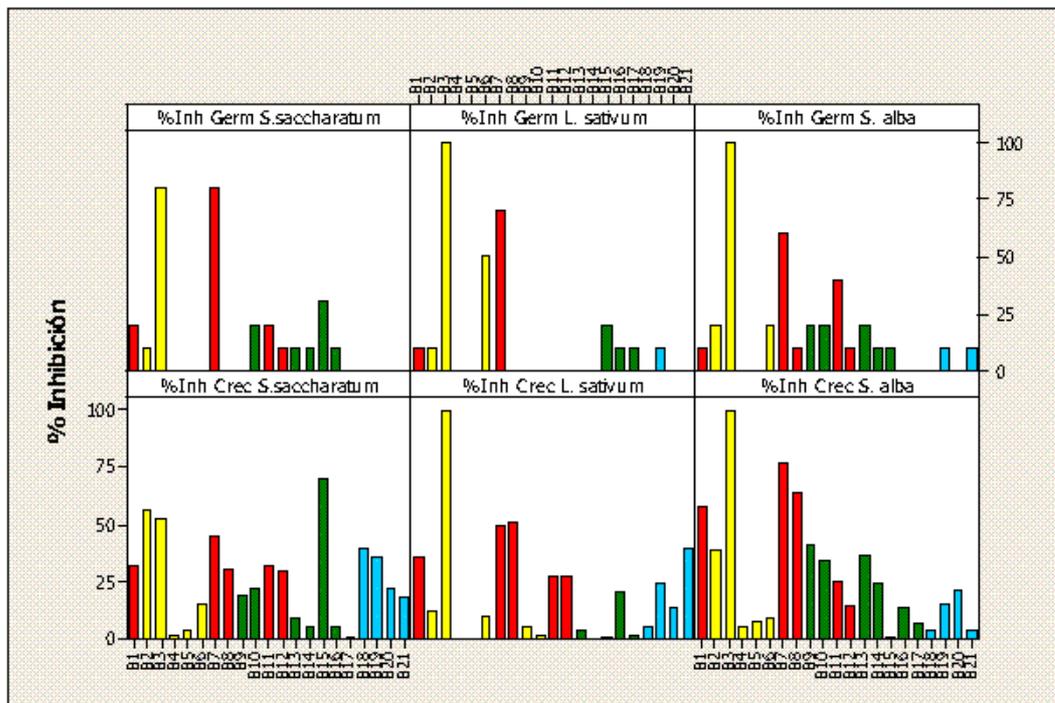


Figura 11.11. Resultados del bioensayo en las muestras de la zona B (rojo) cont. primaria; (amarillo) cont. secundaria; (verde) cont. terciaria; (azul) origen diferente

Al caracterizar los sedimentos de esta zona, se estableció que cuando existía una mezcla con filitas se consideraban afectados por contaminación secundaria, mientras que si aparecían mezclados tanto con filitas como carbonatos, los sedimentos estaban afectados por contaminación terciaria.

Al evaluar la toxicidad en plantas en esta zona, se observa como las filitas tienen menor capacidad de atenuar la contaminación que los carbonatos, ya que la toxicidad de los puntos afectados por contaminación secundaria es mayor que cuando ha existido una mezcla con materiales carbonatados.

En este caso, y a diferencia del método Microtox®, la influencia marina no afecta a la mortalidad.

11.3.3. Zona C- Cabezo Rajao.

En la Figura 11.12 se muestran los resultados del bioensayo en el Cabezo Rajao. En esta zona todas las muestras están muy cercanas a los focos de contaminación, por lo que se han seleccionado dos sedimentos (C1 y C5) como ejemplo de los resultados obtenidos.

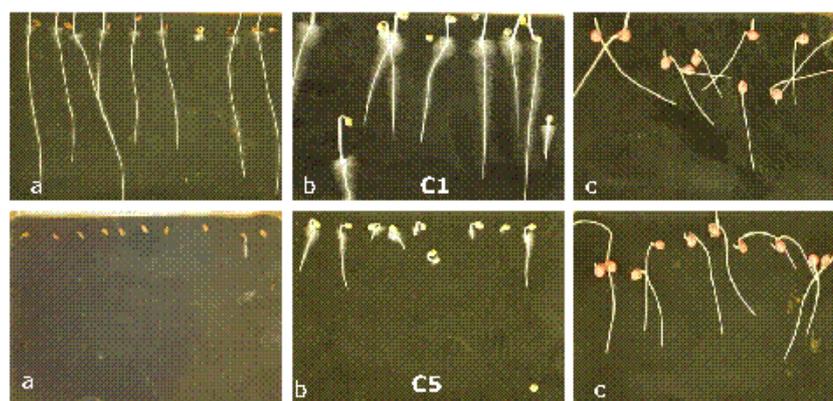


Figura 11.12. Resultados del bioensayo en muestras afectadas por contaminación primaria

a: *Lepidium sativum*. b: *Sinapis alba*. c: *Sorghum saccharatum*

La Tabla 11.5 y la Figura 11.13 recogen los resultados del ensayo en la zona C. En ella se observa que el porcentaje medio de inhibición de la germinación fue del 30% para *S. alba* y del 40% para *L. sativum* y *S. saccharatum*. El porcentaje medio de inhibición del crecimiento presenta valores medios del 42% en *S. saccharatum*, 61% en *S. alba* y 52% en *L. sativum*.

	Media	Máximo	Mínimo
<i>S. saccharatum</i>			
Inhibición germinación	40	100	0
Inhibición crecimiento	42	100	2
<i>L. sativum</i>			
Inhibición germinación	40	100	0
Inhibición crecimiento	52	100	2
<i>S. alba</i>			
Inhibición germinación	30	100	0
Inhibición crecimiento	61	100	14

Tabla 11.5. Resultados del bioensayo Phytotoxkit en la zona C

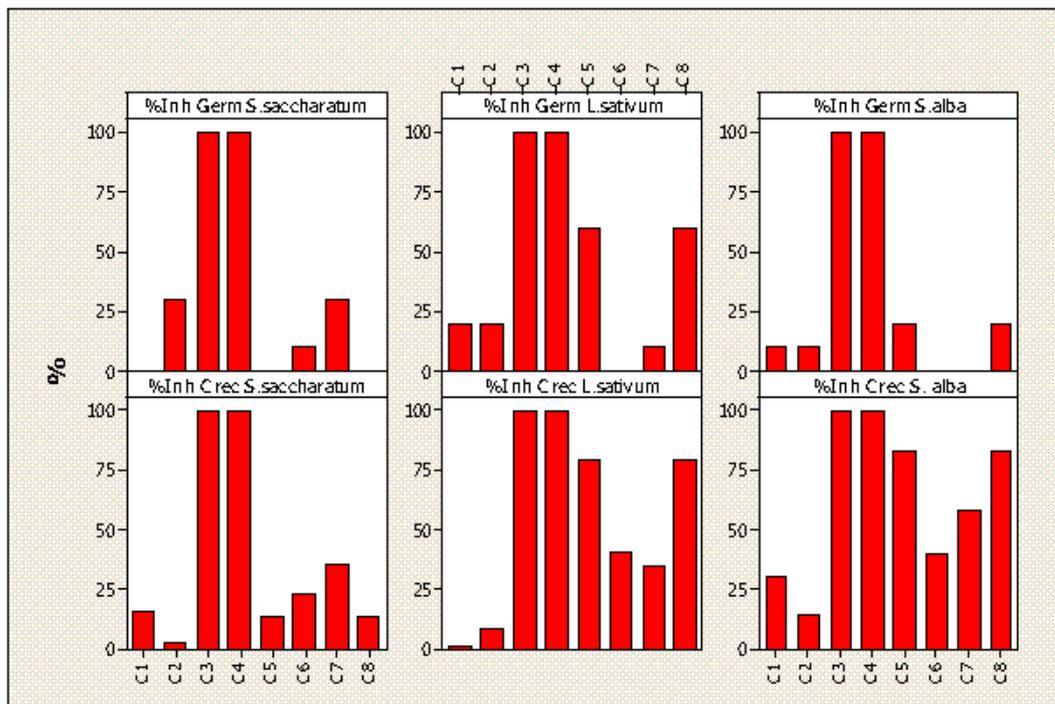


Figura 11.13. Resultados del bioensayo en las muestras de la zona C (rojo) cont. primaria

La Figura 11.13 muestra los resultados para las tres especies seleccionadas en la zona del Cabezo Rajao. Todas las muestras de esta zona están muy influidas por las balsas de estériles de flotación, por lo que los porcentajes de inhibición de la germinación y el crecimiento muy altos, llegando en ocasiones a ser del 100%, como ocurre en los sedimentos C3 y C4.

11.3.4. Zona D- Gorguel.

En la Figura 11.14 se muestran los resultados del bioensayo en la zona D. En esta zona, al igual que en el caso de la zona anterior, todas las muestras están muy influidas por los focos de contaminación.



Figura 11.14. Resultados del bioensayo en una muestra cercana a los focos
a: *Lepidium sativum*. b: *Sinapis alba*. c: *Sorghum saccharatum*

La Tabla 11.6 recoge los resultados del ensayo en la zona D. En ella se observa que el porcentaje medio de inhibición de la germinación fue del 60% para *S. saccharatum* y 70% para *L. sativum* y *S. alba*. El porcentaje medio de inhibición del crecimiento presenta valores medios del 79% en *S. saccharatum*, 77% en *S. alba* y 69% en *L. sativum*.

	Media	Máximo	Mínimo
<i>S. saccharatum</i>			
Inhibición germinación	60	100	0
Inhibición crecimiento	79	100	0
<i>L. sativum</i>			
Inhibición germinación	70	100	0
Inhibición crecimiento	69	100	1
<i>S. alba</i>			
Inhibición germinación	70	100	0
Inhibición crecimiento	77	100	8

Tabla 11.6. Resultados del bioensayo Phytotoxkit en la zona D

En la zona del Gorguel (zona D) es donde aparecen las muestras más tóxicas, con un porcentaje de inhibición de la germinación y del crecimiento de las raíces del 100% en la mayoría de los sedimentos.

El sedimento del punto D1 está situado en una zona de compensación, que como ya se ha comentado anteriormente, recibe aportes de las balsas de la zona, pero en la que al mismo tiempo tiene lugar un transporte de materiales.

Además, los materiales procedentes de las balsas suprayacentes se han mezclado con las filitas del material original, por lo que aunque de manera leve, la contaminación se ha atenuado por lo que los valores de toxicidad son menores.

En los suelos de los puntos D14 y D15 los aportes de las balsas son menores, ya que no se han tomado en el cauce de la Rambla del Gorguel sino en puntos topográficamente más altos. Están menos afectados por las aguas de escorrentía y de ahí la menor toxicidad (Figura 11.15).

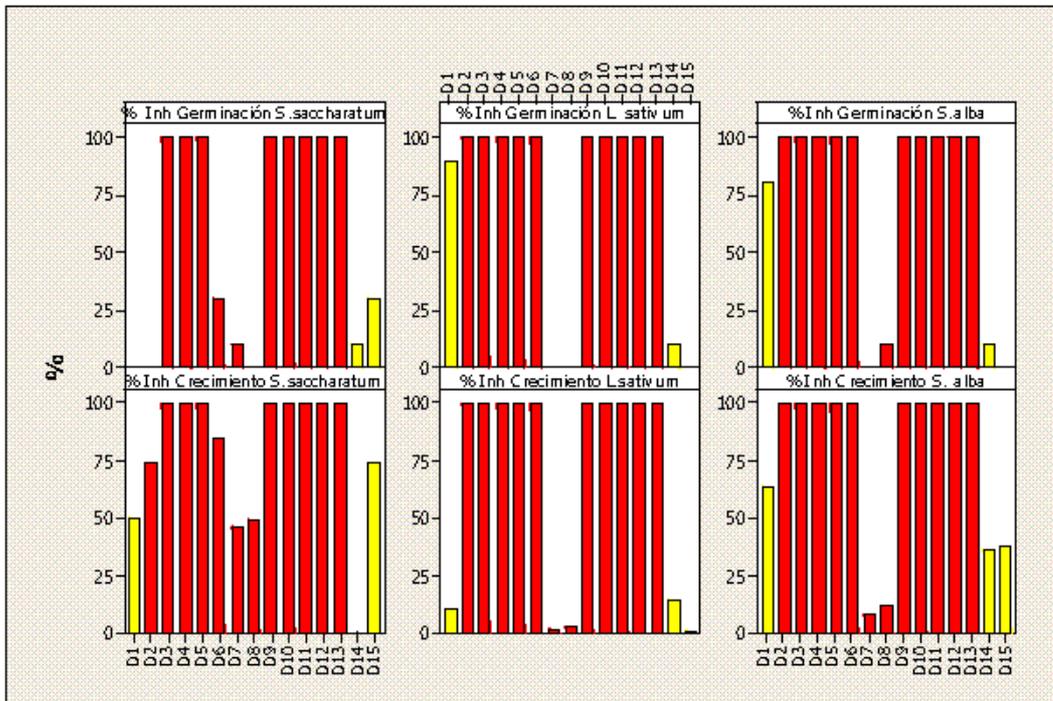


Figura 11.15. Resultados del bioensayo en las muestras de la zona D

11.3.5. Zona E- Portman.

En las Figuras 11.16, 11.17 y 11.18 se muestran los resultados del bioensayo en la zona E para muestras cercanas a los focos (E3), muestras influidas por contaminación terciaria (E9) y muestras sin influencia de estos residuos (E5).

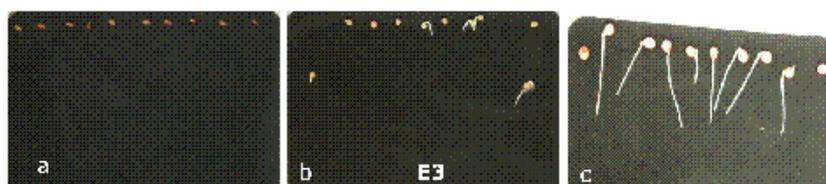


Figura 11.16. Resultados del bioensayo en una muestra cercana a los focos
a: *Lepidium sativum*. b: *Sinapis alba*. c: *Sorghum saccharatum*

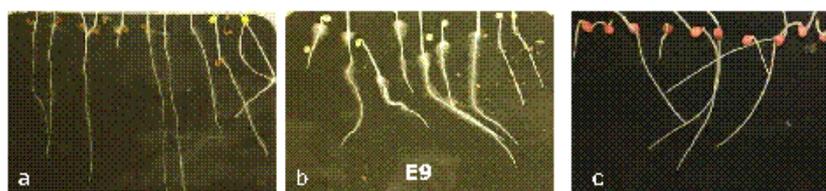


Figura 11.17. Resultados del bioensayo en una muestra influida por los focos
a: *Lepidium sativum*. b: *Sinapis alba*. c: *Sorghum saccharatum*

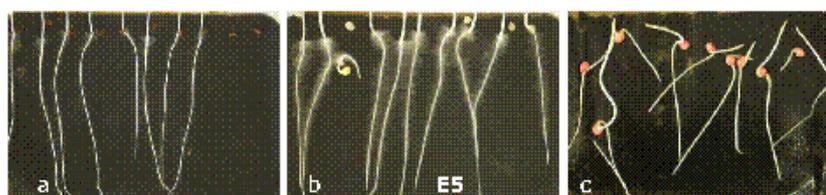


Figura 11.18. Resultados del bioensayo en una muestra no influida por los focos
a: *Lepidium sativum*. b: *Sinapis alba*. c: *Sorghum saccharatum*

En la Tabla 11.7 y la Figura 11.19 se muestran los resultados del ensayo en esta zona. En ella se observa que el porcentaje medio de inhibición de la germinación fue del 10% para *S. saccharatum* y 20% para *L. sativum* y *S. alba*. El porcentaje medio de inhibición del crecimiento presenta valores medios del 28% en *S. saccharatum*, 31% en *S. alba* y 18% en *L. sativum*.

	Media	Máximo	Mínimo
<i>S. saccharatum</i>			
Inhibición germinación	10	100	0
Inhibición crecimiento	28	61	0
<i>L. sativum</i>			
Inhibición germinación	20	100	0
Inhibición crecimiento	18	100	0
<i>S. alba</i>			
Inhibición germinación	20	100	10
Inhibición crecimiento	31	90	1

Tabla 11.7. Resultados del bioensayo Phytotoxkit en la zona E

Como en las zonas anteriores, los valores más elevados de mortalidad e inhibición del crecimiento radicular se dan en los puntos de vertido directo (E3 y E11), en los que las concentraciones de elementos traza son elevadas. Por el contrario, los sedimentos recogidos en los puntos E1 y E2 y que han sufrido un proceso de granoselección, la toxicidad es mucho menor ya que están muy lavados (Figura 11.19).

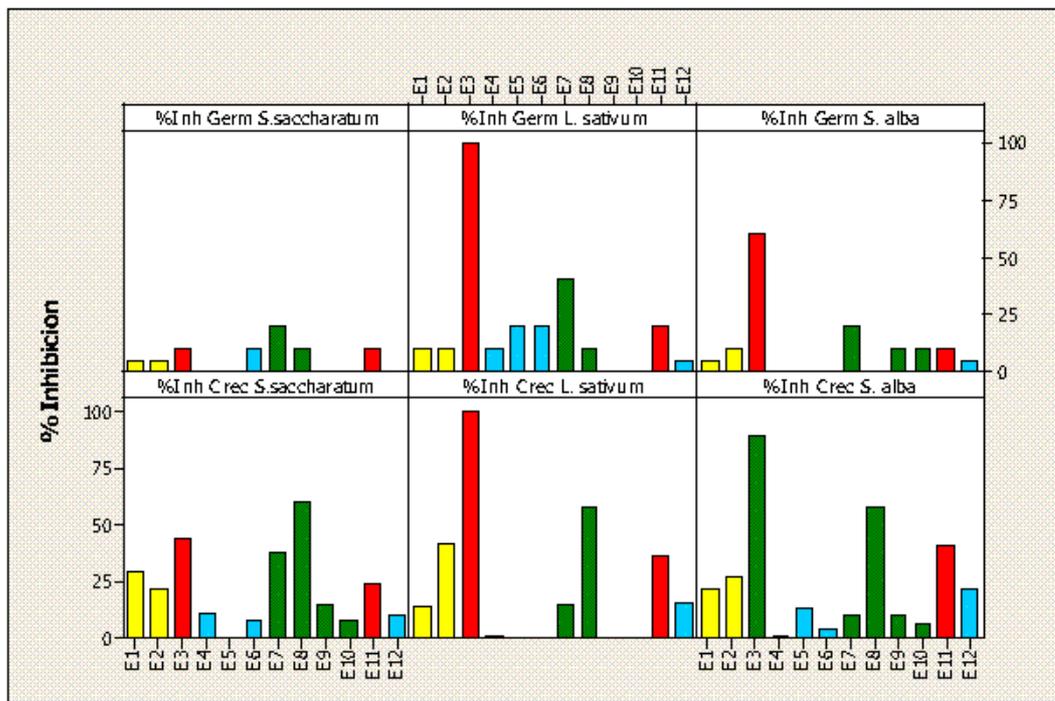


Figura 11.19. Resultados del bioensayo en las muestras de la zona E

Los sedimentos E7, E8, E9 y E10, afectados por contaminación terciaria, tienen porcentajes de mortalidad e inhibición bajos, ya que los materiales procedentes de las balsas de estériles de la Sierra Minera se han mezclado con carbonatos, atenuándose la contaminación a lo largo de la Rambla.

La mortalidad de los sedimentos E4, E5, E6 y E12 se debe a la concentración de elementos traza que presenta la zona sin la influencia minera, es decir, por los valores de fondo (Figura 11.19).

11.3.6. Análisis estadístico de los resultados.

La Tabla 11.8 recoge los resultados del análisis de las correlaciones entre los porcentajes de inhibición (germinación y crecimiento radicular) en las diferentes especies, el contenido en elementos traza tras la extracción con agua y las características analíticas generales de los sedimentos.

Para todas las especies y para los dos parámetros de toxicidad evaluados existe una elevada correlación negativa con el pH, esto es, las muestras con valores de pH básicos son las que presentan menores porcentajes de inhibición, tanto de germinación como de crecimiento de la raíz. Además, también es elevada la correlación con la conductividad eléctrica, muestras con elevados valores de conductividad, y por tanto de sales solubles, conllevan un aumento de la mortalidad y descenso del crecimiento.

En cuanto a los elementos traza, tanto la inhibición en la germinación como en el crecimiento radicular están positivamente correlacionadas con el contenido en cadmio soluble en agua. Además, en el caso de la especie *Sorghum saccharatum*, la inhibición de la germinación está positivamente correlacionada con el contenido en plomo y en cobre solubles.

Se puede decir que la atenuación de la contaminación se manifiesta como un descenso en la toxicidad para estas especies, por lo que se confirma la utilidad del empleo de bioensayos para confirmar los resultados de los análisis químicos.

		99%		95%	
Inh. germinación (%)	<i>S. saccharatum</i>	Cd(r=0,552) CE(r=0,665)	pH(r=-0,55)	Pb(r=0,447)	Cu(r=0,462)
	<i>L. sativum</i>	pH(r=-0,57)	CE(r=0,610)	Cd(r=0,468)	
	<i>S. alba</i>	pH(r=-0,59)	CE(r=0,619)	Cd(r=0,445)	
Inh. crecimiento (%)	<i>S. saccharatum</i>	pH(r=-0,57)	CE(r=0,587)	Cd(r=0,472)	
	<i>L. sativum</i>	Cd(r=0,520) CE(r=0,632)	pH(r=-0,65)		
	<i>S. alba</i>	pH(r=-0,623)	CE(r=0,617)	Cd(r=0,490)	

Tabla 11.8. Matriz de correlación de Pearson para el bioensayo Phytotoxkit® y el contenido en elementos traza tras la extracción en agua

11.4. Bioensayo de toxicidad en ostracodos.

11.4.1. Zona A- Lo Poyo.

Las muestras de la zona A presentan un valor medio de mortalidad en los ostracodos del 37%, con valores del 100% en las muestras A4 y A5, situadas sobre la balsa de estériles de Lo Poyo.

Las muestras A10 y A14, afectadas por contaminación secundaria, tienen elevada mortalidad, mientras que en los puntos de muestreo afectados por contaminación terciaria o con origen diferente, ya sean suelos rojos o arenas de playa, los porcentajes de mortalidad fueron significativamente inferiores.

En aquellas muestras en las que el porcentaje de mortalidad era inferior al 40% se determinó el porcentaje de inhibición del crecimiento, con un valor medio en esta zona del 25% (Figura 11.20).

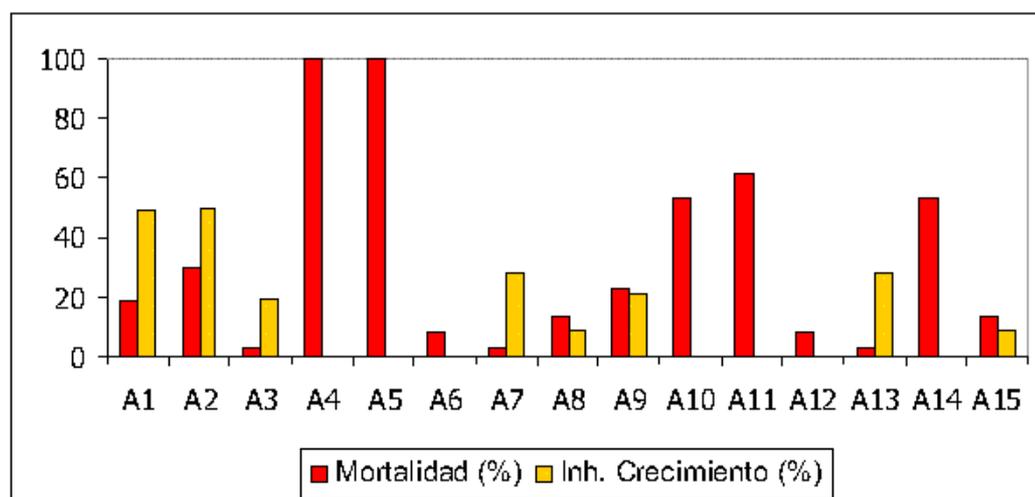


Figura 11.20. % de mortalidad e inhibición en el crecimiento del ostracodo *Heterocypris incongruens* en la zona A

11.4.2. Zona B- Llano del Beal.

Las muestras del Llano del Beal presentan un porcentaje de mortalidad mayor que las de Lo Poyo, con un promedio del 47% y valores del 100% en las muestras B1, B6, B7, B8, B9, B11, B12 y B14, que o bien están situadas muy cerca de un foco contaminante, por lo que están afectadas por contaminación primaria (B1, B7, B8, B11 y B12) o bien a pesar de que existe mezcla con las filitas del material encajante, la influencia de las balsas sigue siendo significativa (B2, B3, B4, B5 y B6) (Figuras 11.21 y 11.22).

Las muestras B18 a B21 se corresponden con suelos rojos, dedicados al cultivo y en los que la mortalidad del ostracodo es mucho menor que las influidas por la actividad minera. Aún así, estas muestras presentan mayor mortalidad que algunas de las consideradas afectadas por contaminación terciaria, ya que los suelos rojos sobre los que se sitúan estas muestras presentan valores de fondo elevados para algunos elementos traza (Figura 11.21).

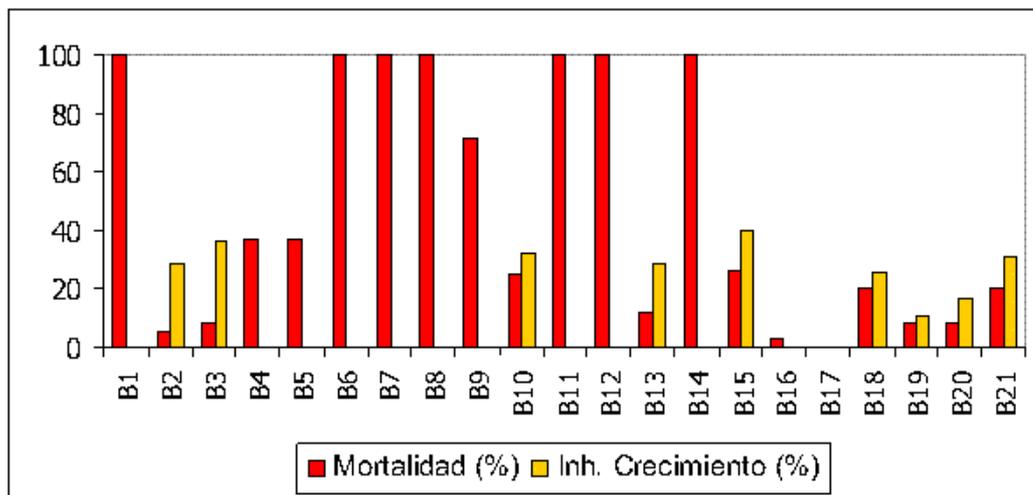


Figura 11.21. % de mortalidad e inhibición en el crecimiento del ostracodo *Heterocypris incongruens* en la zona B

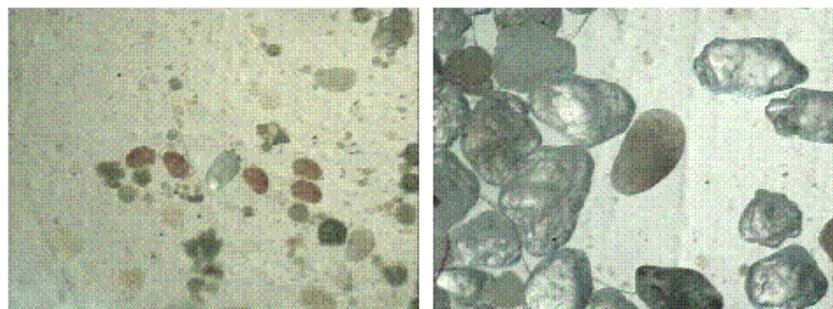


Figura 11.22. Fotografía del ostracodo *Heterocypris incongruens* tras 1 día de incubación (izq) y a los 6 días (dcha)

11.4.3. Zona C- Cabezo Rajao.

En esta zona, y como se muestra en la Figura 11.23, todas las muestras presentan elevada mortalidad, con un valor medio del 86%. Todas ellas están muy influidas por las balsas de estériles de flotación y escombreras del Cabezo Rajao, que actúa como un gran foco de contaminación (Figuras 11.23 y 11.24).

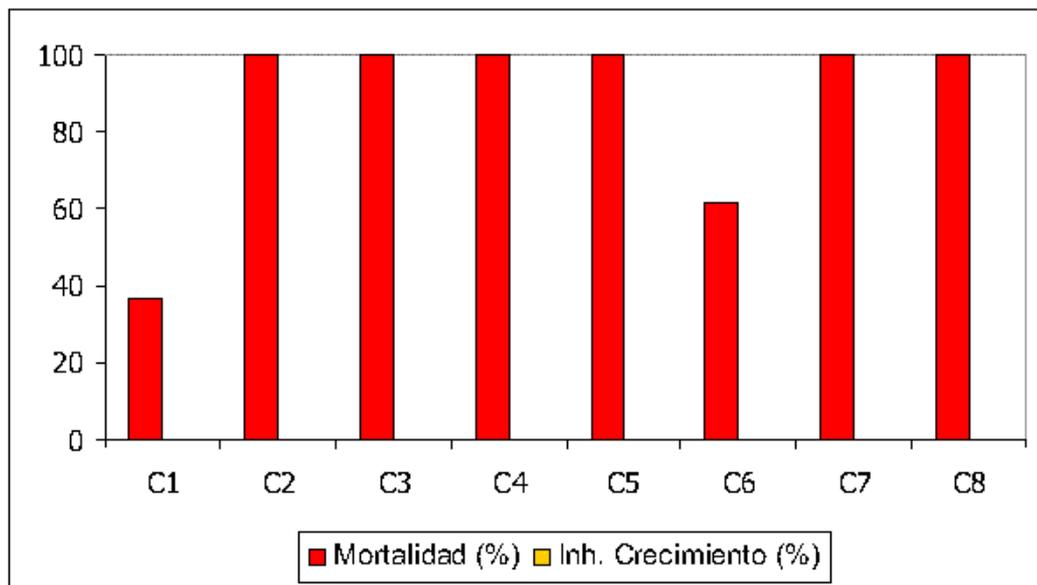


Figura 11.23. % de mortalidad e inhibición en el crecimiento del ostracodo *Heterocypris incongruens* en la zona C

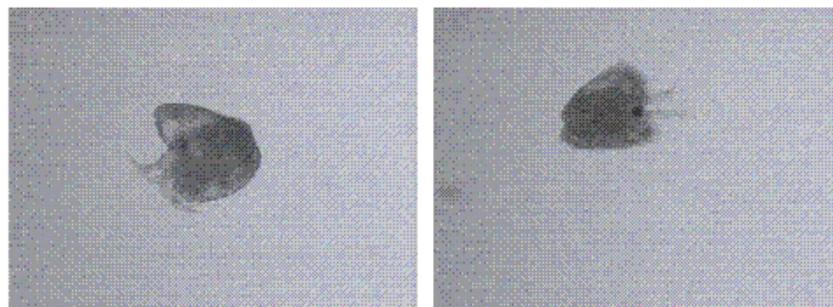


Figura 11.24. Imágenes de microscopía electrónica del ostracodo *Heterocypris incongruens*

11.4.4. Zona D- Gorguel.

La zona D, junto con la C, es la que presenta la mortalidad más elevada para el ostracodo. En este caso, y a excepción de la muestra D15, todas presentan una mortalidad del 100% (Figuras 11.25 y 11.26).

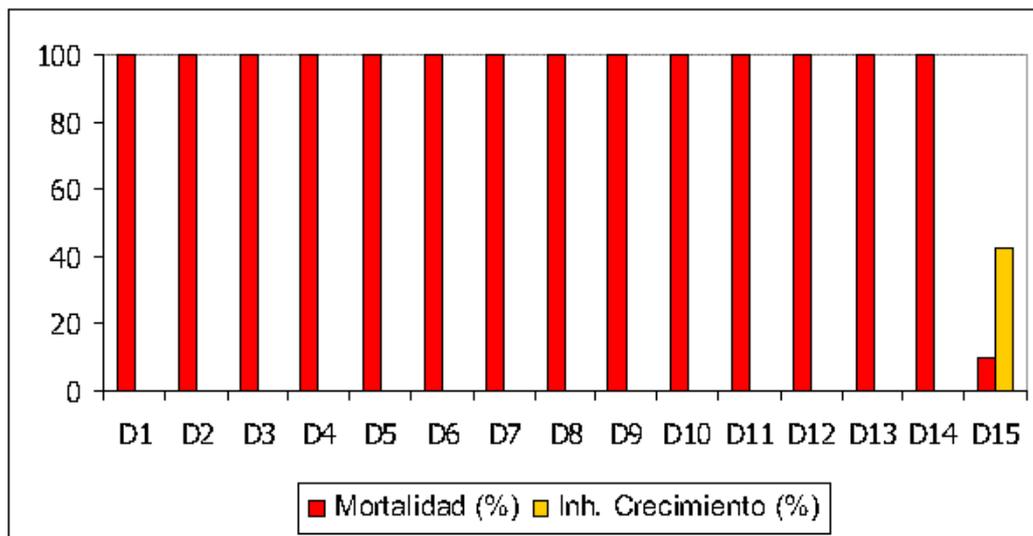


Figura 11.25. % de mortalidad e inhibición en el crecimiento del ostracodo *Heterocypris incongruens* en la zona D

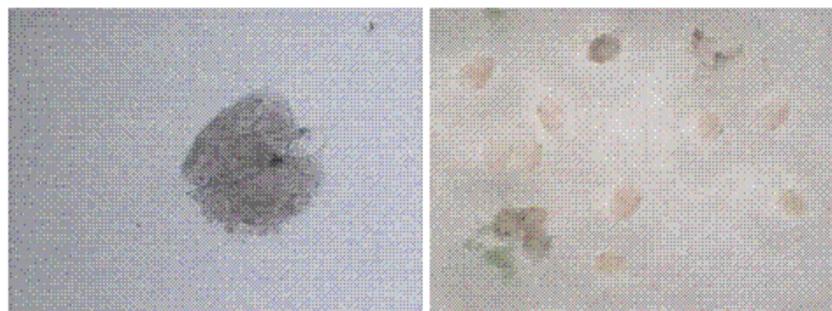


Figura 11.26. Imágenes de tomadas con microscopio electrónico (izq) y lupa binocular (dcha) del ostracodo *Heterocypris incongruens*

11.4.5. Zona E- Portman.

Las muestras de la zona E tienen un valor medio de mortalidad del 25%, el más bajo de las cinco zonas. Como en el caso del bioensayo con vegetales, las muestras que presentan mayor toxicidad son la E3 y E11, que se corresponden con puntos de vertido directo (Figura 11.27). La mortalidad de los organismos en los sedimentos E1 y E2 no se debe a la presencia de metales solubles, ya que estos sedimentos han sufrido un lavado, sino que es debida a que este organismo es muy sensible a la presencia de sales, por lo que en puntos muy cercanos al mar, pueden darse porcentajes de mortalidad elevados.

En los puntos afectados por contaminación terciaria los porcentajes de mortalidad son bajos, por lo que se confirma la atenuación de la contaminación que ha tenido lugar a lo largo de la Rambla de Portman.

Finalmente, en los sedimentos E4, E5, E6 y E12, no afectados por la influencia minera, la inhibición del crecimiento y la mortalidad del organismo es muy baja, y debida a las concentraciones geogénicas de los elementos traza (Figura 11.27).

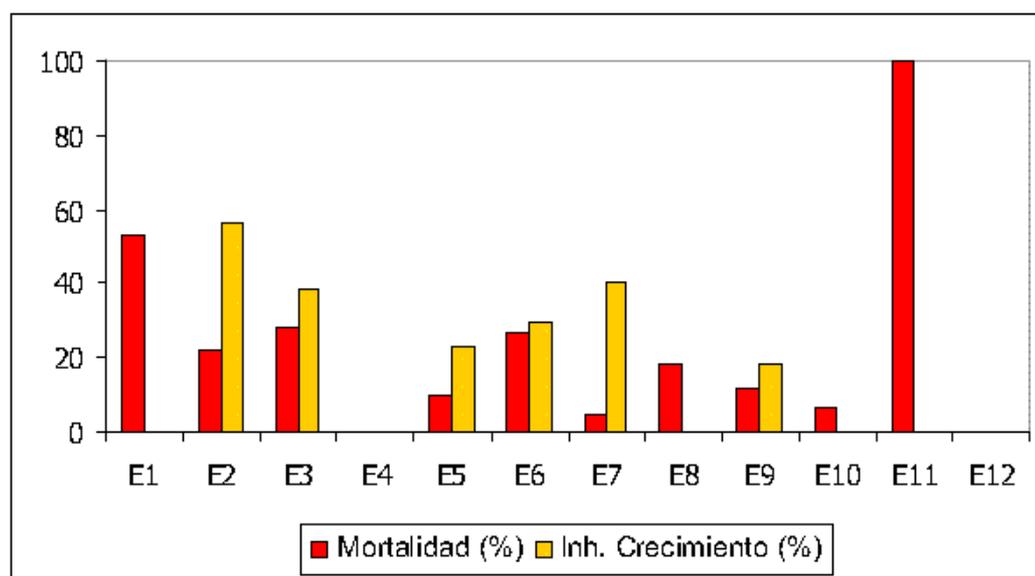


Figura 11.27. % de mortalidad e inhibición en el crecimiento del ostracodo *Heterocypris incongruens* en la zona E

11.4.6. Análisis estadístico de los resultados.

La Tabla 11.9 recoge los resultados del análisis de las correlaciones entre los porcentajes de mortalidad e inhibición del crecimiento para el ostracodo bentónico *Heterocypris incongruens*, el contenido en elementos traza tras la extracción en agua y las características analíticas generales de los sedimentos.

Existe una elevada correlación negativa entre el pH y la mortalidad de los ostracodos, al igual que ocurría con el ensayo con plantas. Además, también es elevada la correlación con la conductividad eléctrica.

En cuanto a los elementos traza, la mortalidad está positivamente correlacionada con el cadmio y el manganeso soluble, mientras que la inhibición en el crecimiento lo hace con el manganeso y el cinc solubles.

	99%		95%	
Mortalidad (%)	pH (r=-0,746)	CE (r=0,541)	Cd (r=0,475)	Mn (r=0,408)
Inhibición crecimiento (%)			Zn (r=0,433)	Mn (r=0,426)

Tabla 11.9. Matriz de correlación de Pearson para el bioensayo Ostracodtoxkit® y el contenido en elementos traza tras la extracción en agua

11.5. Transferencia de elementos traza a plantas naturales.

Las técnicas tradicionales de remediación de suelos contaminados con elementos traza generalmente son prácticas de ingeniería civil, aplicadas individualmente o en grupo. En estos procesos físicos, químicos y térmicos principalmente se requiere eliminar físicamente el suelo del emplazamiento contaminado o bien minimizar el riesgo de exposición (McIntyre, 2003; Shi y Cai, 2009).

Estas técnicas tienen como desventaja un alto coste, elevado consumo de energía, destrucción del emplazamiento contaminado y problemas de logística (Fellet et al., 2007; Nedelkoska y Doran, 2000; Susarla et al., 2002).

Debido a las limitaciones que presentan las tecnologías tradicionales de remediación, surge la necesidad de utilizar técnicas alternativas, tales como la fitorremediación, que consiste en la eliminación, transferencia, estabilización y/o degradación y neutralización de compuestos orgánicos, inorgánicos y radioactivos que pueden resultar tóxicos para los organismos (Brunner et al., 2008).

Se basan en la capacidad que presentan algunas especies vegetales de acumular elementos traza (Álvarez et al., 2003; Sánchez et al., 1998).

La incorporación de elementos traza a las plantas se produce generalmente por absorción a través de las raíces, aunque también puede ocurrir por deposición de estos elementos en las hojas (Figura 11.28) (Kabata-Pendias, 2001).

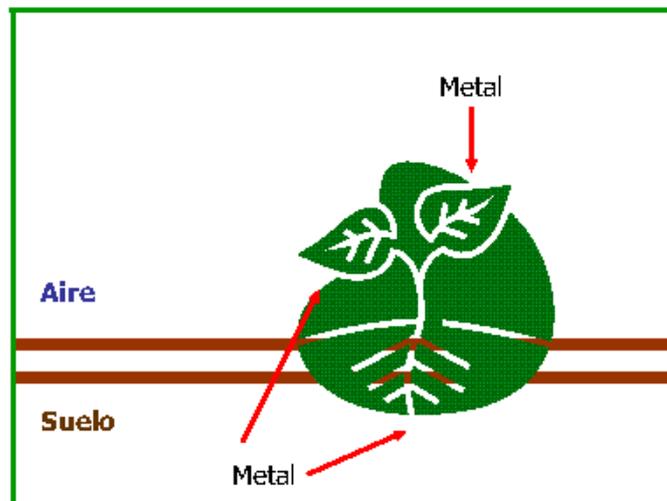


Figura 11.28. Patrones de incorporación de metales pesados a las plantas

Entre las ventajas que presenta la fitorremediación con respecto a los métodos convencionales destaca en primer lugar que es una tecnología de bajo coste; en segundo lugar, que posee un impacto regenerativo en lugares en donde se aplica y en tercer lugar que la capacidad extractiva se mantiene debido al crecimiento vegetal (Agunbiade et al., 2009).

De los diferentes procesos de fitorremediación, sólo cuatro son relevantes para el caso de elementos traza: fitoextracción, fitoestabilización, rizofiltración y fitovolatilización.

- Fitoextracción: Consiste en la absorción de elementos traza mediante las raíces de las plantas y su acumulación en tallos y hojas (Fornes et al., 2009).
- Fitoestabilización: Se utiliza en suelos donde la gran cantidad de contaminantes imposibilita la fitoextracción, y se basa en el uso de plantas tolerantes a los metales para inmovilizarlos a través de su absorción y acumulación en las raíces o precipitación en la rizosfera, reduciendo así su movilidad y su biodisponibilidad para otras plantas o microorganismos (Fornes et al., 2009).
- Rizofiltración: se basa en el uso de las raíces para absorber, concentrar y precipitar elementos traza, a través de procesos bióticos o abióticos (Verma et al., 2006).

- **Fitovolatilización:** Implica la absorción, metabolismo interno y transpiración de las plantas con la consiguiente eliminación de los contaminantes o sus metabolitos (LeDuc y Ferry, 2005).

Las plantas que crecen en emplazamientos contaminados pueden actuar de dos maneras frente a un sedimento con elevada concentración de elementos traza (Figura 11.29):



Figura 11.29. Concentración de elementos traza en las plantas y su relación con la concentración en el exterior

Exclusión: Implica la formación de compuestos bioquímicos complejos en el medio ambiente o en la pared celular de las plantas; la precipitación de elementos traza en el exterior, a través de secreción de mucílagos y otros compuestos orgánicos y/o la alteración de los sistemas de transporte de la membrana para reducir la entrada de estos elementos (Cui et al., 2007).

Inclusión y acumulación. Comprende la captura en el interior de las células donde no tienen efectos tóxicos, como en la vacuola y la pared celular; la detoxificación interna a través de la incorporación a proteínas, ácidos orgánicos, histidina y péptidos ricos en grupos tiol, denominados fitoquelatinas y/o las reacciones de óxido-reducción que cambian el estado reactivo a una forma menos tóxica (Fiecherová et al., 2006).

En el proceso de acumulación de elementos traza se dan los siguientes mecanismos:

- a. Los iones alcanzan la zona de absorción de la raíz por difusión a través de la solución salina del suelo, son arrastrados por el movimiento del agua hacia la raíz o entran en contacto con las zonas de absorción a medida que la raíz crece (Fernández y Maldonado, 2000).
- b. Las raíces absorben los elementos traza hidratados, a través de sistemas de transporte como bombas primarias, canales iónicos y transportadores.
- c. Los elementos traza se transportan desde las raíces a la parte aérea vía xilema, apareciendo como iones hidratados o como complejos.
- d. Los elementos traza se distribuyen dentro de las células.

Las plantas denominadas fitorremediadoras se caracterizan por tener la capacidad de acumular elementos traza, preferiblemente en su parte aérea. Además, son tolerantes a la concentración del elemento acumulado, crecen rápido, tienen elevada producción de biomasa, resultan fácilmente cosechables y contienen sustancias que impiden que los herbívoros las consuman, para prevenir la transferencia a la cadena trófica (Yoon et al., 2006).

Dentro de las plantas fitorremediadoras destacan las plantas llamadas hiperacumuladoras, que poseen la capacidad de absorber elementos traza a niveles 100 veces superiores a la media de la especie vegetal considerada (Wójcik et al., 2005). Suelen aparecer a menudo en zonas con elevadas concentraciones de elementos traza en el suelo, donde esta tolerancia supone una ventaja (Gonzaga et al., 2006; Sun et al., 2006).

Las especies hiperacumuladoras presentan las siguientes características:

- Concentraciones superiores a 10000 mg kg^{-1} (peso seco) para cinc y manganeso, 1000 mg kg^{-1} para cobalto, cobre, níquel, arsénico y selenio y 100 mg kg^{-1} para el cadmio (Baker y Brooks, 1989).
- Presentar un factor de bioconcentración (concentración planta/concentración suelo) superior a la unidad, alcanzando en algunas ocasiones valores entre 50-100 (Sun et al., 2008).

- Presentar un factor de transferencia (concentración en hojas/concentración en las raíces) superior a la unidad (Sun et al., 2008).

La presencia de vegetación tolerante disminuye la erosión hídrica y eólica, así como puede favorecer la inmovilización física y química, ya sea por absorción radicular o por inducir la retención química en el suelo (Conesa et al., 2007a). Lo más adecuado es el uso de especies nativas, ya que presentan mayor posibilidad de supervivencia, crecimiento y reproducción que otras especies introducidas desde otros ambientes (Adriano, 2001).

El estudio de transferencia de elementos traza a plantas que crecen de manera natural en la zona de estudio se ha llevado a cabo en 15 suelos de las zonas B, D y E en las que se han recogido 5 especies vegetales: *Limonium carthaginens*, *Arthrocnemum macrostachyum*, *Dittrichia viscosa*, *Glaucium flavum* y *Zygophyllum fabago*.

En todas ellas se ha determinado el contenido en elementos traza, tanto en raíces como en hojas, para posteriormente calcular el factor de bioconcentración (BCF) y el de transferencia (TF).

11.5.1. *Limonium carthaginens*.

Es un endemismo de la Región de Murcia (Figura 11.30), que únicamente aparece en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión. Esta especie tiene escasas necesidades nutricionales y aparece de manera natural en áreas de elevada salinidad (Ottenhof et al., 2007).



Figura 11.30. Ejemplares de *Limonium carthageniensis* recogidos en la zona de estudio

En las Tablas 11.10 y 11.11 se recogen los valores medios de concentración de elementos traza en las muestras de esta especie vegetal, en raíces y hojas, y la Tabla 11.12 los resultados del factor de bioconcentración (BCF) y transferencia (TF).

Raíz	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Hg
	mg/kg							µg/kg
Máximo	490,7	166,8	5,7	1273,3	22,4	13,4	180,8	142,2
Media	391,8	137,8	2,9	909,2	8,4	11,1	75,1	96,0
Mínimo	274,3	109,7	1,4	501,2	0,4	7,8	17,5	27,2
Desv Est	97,4	25,5	2,1	346,3	10,5	2,6	78,7	53,2

Tabla 11.10. Concentraciones de elementos traza en raíces de *L. carthageniensis*

Hojas	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Hg
	mg/kg							µg/kg
Máximo	321,1	161,8	4,9	1299,3	5,8	10,2	38,5	467,4
Media	297,2	137,8	2,9	900,8	2,7	8,1	28,6	258,0
Mínimo	272,3	115,5	1,1	564,4	0,5	6,2	22,3	77,4
Desv Est	21,8	20,7	1,7	330,8	2,4	1,8	7,6	175,3

Tabla 11.11. Concentraciones de elementos traza en hojas de *L. carthageniensis*

Para los elementos traza estudiados, la concentración en las hojas es inferior a la determinada en las raíces. El factor de bioconcentración y el de transferencia es menor a la unidad para todas las muestras a excepción del caso

del mercurio. Debido a las bajas concentraciones de mercurio en la zona, los resultados de BCF y TF pueden no ser significativos.

Limonium carthaginiens puede considerarse tolerante pero no hiperacumuladora, ya que las plantas tolerantes tienden a restringir la transferencia de la raíz a las hojas, mientras que las especies hiperacumuladoras absorben con facilidad a la raíz y de ahí es transferido a la biomasa aérea (Yoon et al., 2006).

Hojas	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Hg
BCF	0,05	0,05	0,10	0,01	0,01	0,12	0,01	5,72
TF	0,71	0,78	0,71	0,80	0,56	0,62	0,58	6,15

Tabla 11.12. Valores del índice de bioconcentración y transferencia en *L. carthaginiens*

11.5.2. *Dittrichia viscosa*.

Dittrichia viscosa (Figura 11.31) es una especie arbustiva, que pertenece a la familia de las asteráceas o compuestas, ampliamente distribuida por la región mediterránea, en donde suele aparecer en áreas alteradas por la acción antrópica (Murciego Murciego et al., 2007).



Figura 11.31. Ejemplares de *Dittrichia viscosa* recogidos en la zona de estudio

Las Tablas 11.13 y 11.14 recogen los valores medios de concentración de elementos traza en las muestras de esta especie vegetal en su bioamasa subterránea y aérea y los resultados del factor de bioconcentración (BCF) y transferencia (TF) vienen recogidos en la Tabla 11.15.

Raíz	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Hg
	mg/kg							µg/kg
Máximo	2373,8	1311,8	92,4	67817,8	109,6	46,3	1106,9	1325,3
Media	645,4	445,6	25,2	33955,9	36,6	21,7	339,9	389,7
Mínimo	145,8	93,0	0,6	792,9	0,7	4,4	26,4	10,3
Desv Est	872,6	455,9	38,8	26397,4	44,9	17,6	405,9	487,2

Tabla 11.13. Concentraciones de elementos traza en raíces de *D. viscosa*

Hojas	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Hg
	mg/kg							µg/kg
Máximo	258,1	519,3	6,4	1398,9	44,4	27,1	86,9	561,0
Media	187,5	187,4	3,9	1118,6	13,6	14,8	65,2	259,4
Mínimo	36,7	56,3	2,8	976,5	0,6	4,0	30,0	56,6
Desv Est	89,4	186,3	1,4	170,9	18,4	9,5	22,2	202,3

Tabla 11.14. Concentraciones de elementos traza en hojas de *D. viscosa*

Hojas	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Hg
BCF	0,33	0,48	0,38	0,43	0,05	0,17	0,15	1,22
TF	0,45	0,65	1,41	0,20	0,50	0,77	0,35	1,86

Tabla 11.15. Valores del índice de bioconcentración y transferencia en *D. viscosa*

El factor de bioconcentración es menor a la unidad para todos los elementos a excepción del mercurio, como ocurría con la especie *L. carthagensis*.

El factor de transferencia es superior a la unidad para el cadmio, de manera que este elemento es transportado a la biomasa aérea, pudiendo considerarse esta especie hiperacumuladora de cadmio.

11.5.3. *Zygophyllum fabago*.

Zygophyllum fabago (Zigofiláceas) crece frecuentemente en suelos ácidos del sur de Europa y regiones costeras del Mediterráneo (Conesa et al., 2007b). Puede considerarse una especie invasora en zonas de cultivo y en casos extremos la colonización por parte de esta especie desplaza a la vegetación nativa de la zona (Figura 11.32).



Figura 11.32. Ejemplares de *Zygophyllum fabago* recogidos en la zona de estudio

Al igual que en el resto de especies estudiadas, el contenido en elementos traza es más elevado en las raíces que en las hojas, por lo que puede afirmarse que la especie es tolerante pero no hiperacumuladora (Tablas 11.16 a 11.18).

Raíz	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Hg
	mg/kg							µg/kg
Máximo	1113,4	199,9	7,6	1104,0	2,6	24,4	112,1	147,0
Media	732,8	113,8	3,8	618,1	1,6	15,1	74,7	104,1
Mínimo	324,5	60,5	1,1	199,7	0,4	5,7	31,5	1,5
Desv Est	341,7	60,2	2,6	406,7	0,9	8,4	33,9	65,9

Tabla 11.16. Concentraciones de elementos traza en raíces de *Z. fabago*

Hojas	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Hg
	mg/kg							µg/kg
Máximo	1033,8	65,8	5,3	359,9	0,2	28,2	70,5	386,1
Media	441,7	47,4	3,1	280,7	0,2	11,8	35,8	201,8
Mínimo	142,1	35,2	0,9	149,9	0,2	3,3	11,5	65,1
Desv Est	371,8	12,1	1,7	84,1	0,0	11,0	24,9	141,0

Tabla 11.17. Concentraciones de elementos traza en hojas de *Z. fabago*

Hojas	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Hg
BCF	0,23	0,05	0,18	0,004	0,003	0,11	0,03	0,34
TF	0,62	0,50	0,85	0,63	0,40	0,72	0,55	2,61

Tabla 11.18. Valores del índice de bioconcentración y transferencia en *Z. fabago*

11.5.4. *Glaucium flavum*.

Esta especie pertenece a la familia de las papaveráceas y se distribuye por el sur y oeste de Europa, en zonas cercanas a la costa (Figura 11.33).



Figura 11.33. Ejemplares de *Glaucium flavum* recogidos en la zona de estudio

Las Tablas 11.19 y 11.20 recogen los valores medios de concentración de elementos traza en las muestras de esta especie vegetal y los resultados del factor de bioconcentración (BCF) y transferencia (TF) vienen recogidos en la Tabla 11.21.

Raíz	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Hg
	mg/kg							µg/kg
Máximo	2452,9	2410,8	13,9	242,8	85,4	39,6	446,0	243,3
Media	1406,4	1231,6	7,6	240,6	42,8	25,1	296,9	121,7
Mínimo	359,9	52,4	1,4	238,3	0,2	10,5	147,8	0,1
Desv Est	1046,5	1179,2	6,3	2,2	42,6	14,6	149,1	121,6

Tabla 11.19. Concentraciones de elementos traza en raíces de *G. flavum*

Hojas	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Hg
	mg/kg							µg/kg
Máximo	346,5	248,0	13,4	327,0	5,4	27,2	121,3	7,9
Media	289,1	147,5	7,3	274,9	2,8	18,0	83,8	4,0
Mínimo	231,6	47,0	1,1	222,8	0,2	8,8	46,3	0,1
Desv Est	57,5	100,5	6,2	52,1	2,6	9,2	37,5	3,9

Tabla 11.20. Concentraciones de elementos traza en hojas de *G. flavum*

Hojas	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Hg
BCF	0,48	0,35	0,65	0,28	0,28	0,60	0,42	0,41
TF	0,53	0,50	0,90	1,14	0,06	0,77	0,46	0,12

Tabla 11.21. Valores del índice de bioconcentración y transferencia en *G. flavum*

El factor de bioconcentración es menor a la unidad para todos los elementos y el factor de transferencia es superior a la unidad para el hierro, esto es, este elemento es transportado a la biomasa aérea de la planta, por lo que podrían considerarse hiperacumuladora de hierro y tolerante para el resto de elementos traza.

11.5.5. *Arthrocnemum macrostachyum*.

Arthrocnemum macrostachyum es una especie arbustiva que crece en zonas arenosas costeras. Es una planta perenne, cuyos tallos son segmentados.

Los segmentos de la envoltura floral carecen de apéndices en el fruto, el cual al desprenderse deja un hueco simple. Pertenece a la familia Chenopodiácea y sobre todo aparece en el Sur de la Región de Murcia (Figuras 11.34 y 11.35), especialmente en zonas salinas (Ballester Sabater et al., 2003).

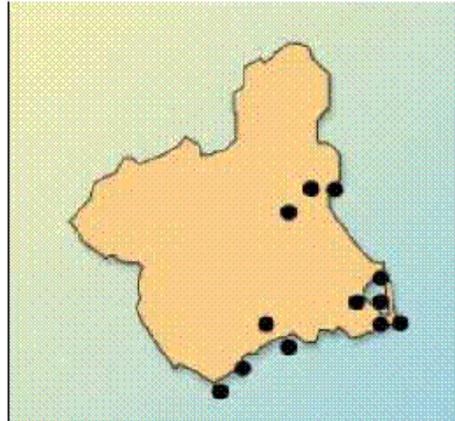


Figura 11.34. Distribución conocida de *Arthrocnemum macrostachyum* en la Región de Murcia (extraído de Ballester Sabater et al., 2003)



Figura 11.35. Ejemplares de *Arthrocnemum macrostachyum* recogidos en la zona de estudio

Las Tablas 11.22 y 11.23 recogen los valores medios de concentración de elementos traza en las muestras de esta especie vegetal y los resultados del factor de bioconcentración (BCF) y transferencia (TF) vienen recogidos en la Tabla 11.24.

Raíz	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Hg
	mg/kg							µg/kg
Máximo	10011,8	1089,5	172,5	16784,5	146,9	103,1	734,0	342,3
Media	4892,8	743,0	64,4	9499,0	97,4	70,2	597,4	234,2
Mínimo	1231,5	443,3	2,2	3694,6	43,6	29,6	510,0	103,7
Desv Est	3745,4	266,0	72,9	5428,6	42,2	30,3	95,8	98,9

Tabla 11.22. Concentraciones de elementos traza en raíces de *A. macrostachyum*

Hojas	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Hg
	mg/kg							µg/kg
Máximo	2181,3	959,8	4,5	24236,5	113,8	26,7	2593,3	84,2
Media	1649,1	723,6	3,4	18822,2	101,0	19,9	1893,4	61,1
Mínimo	767,0	554,0	1,8	12231,0	88,0	12,0	1211,0	29,0
Desv Est	667,0	185,9	1,2	5416,1	11,5	6,6	618,3	25,3

Tabla 11.23. Concentraciones de elementos traza en hojas de *A. macrostachyum*

Hojas	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Hg
BCF	1,01	0,47	2,34	0,03	0,08	0,70	0,05	0,52
TF	0,22	0,88	0,03	1,44	1,07	0,26	4,76	0,25

Tabla 11.24. Valores del índice de bioconcentración y transferencia en *A. macrostachyum*

El factor de bioconcentración es superior a la unidad para el cinc y el cadmio, por lo que ha tenido lugar una absorción desde el suelo a las raíces, aunque no se ha dado transferencia a la biomasa aérea.

Por otro lado, el hierro y el manganeso han sido transportados a la biomasa aérea, ya que su valor de TF es superior a la unidad (Tabla 11.24).

11.6. Transferencia de elementos traza a la especie humana.

Para llevar a cabo los estudios de absorción de contaminantes en humanos es necesario tener en cuenta en primer lugar, la similitud entre el material empleado en el ensayo y el existente en el emplazamiento contaminado y, en segundo lugar, la similitud del ensayo con las condiciones fisiológicas reales que se dan con la especie humana.

Podemos diferenciar entre biodisponibilidad absoluta y relativa, definiendo biodisponibilidad absoluta como la relación entre la dosis absorbida y la dosis administrada:

$$\text{Biodisponibilidad absoluta} = \text{Dosis absorbida} / \text{Dosis administrada} \times 100$$

La dosis absorbida se determina mediante ensayos *in vivo*, determinando la concentración del contaminante en sangre o en orina, heces o aire espirado, tanto en animales como en el ser humano.

La biodisponibilidad relativa es una medida de la absorción entre dos o más formas de un mismo compuesto, diferentes vías (comida, suelo y/o agua) o diferentes dosis. Esta medida es importante en estudios medioambientales porque el efecto matriz puede disminuir la biodisponibilidad del elemento retenido en el suelo o sedimento, con respecto a la forma del metal y el medio usados en el estudio toxicológico.

En el ámbito de la evaluación de riesgos medioambientales la biodisponibilidad relativa se define como la relación entre la fracción absorbida en el medio de exposición y la fracción absorbida en el medio usado en el estudio toxicológico (Naidu et al., 2008).

$$\text{Biodisponibilidad relativa} = \text{Dosis absorbida medio exposición} / \text{Fracción absorbida del medio usado en el estudio toxicológico} \times 100$$

Normalmente esta fracción se calcula experimentalmente mediante ensayos *in vivo* con animales o *in vitro* en laboratorio.

Independientemente del ámbito de aplicación, la biodisponibilidad de un contaminante depende de tres factores: el contacto entre el receptor y la matriz que contiene al contaminante, la liberación de una fracción del contaminante presente en dicha matriz, con lo cual presenta una disponibilidad potencial y, por último, la capacidad de absorción que presenta el receptor al contaminante.

Durante la digestión de un suelo contaminado con elementos traza tienen lugar dos procesos fundamentales que afectan a la biodisponibilidad de los mismos (Figura 11.36): en primer lugar, la solubilización del metal de la matriz sólida y, en segundo lugar, la absorción del metal a través de las membranas epiteliales del intestino delgado (Naidu et al., 2008).

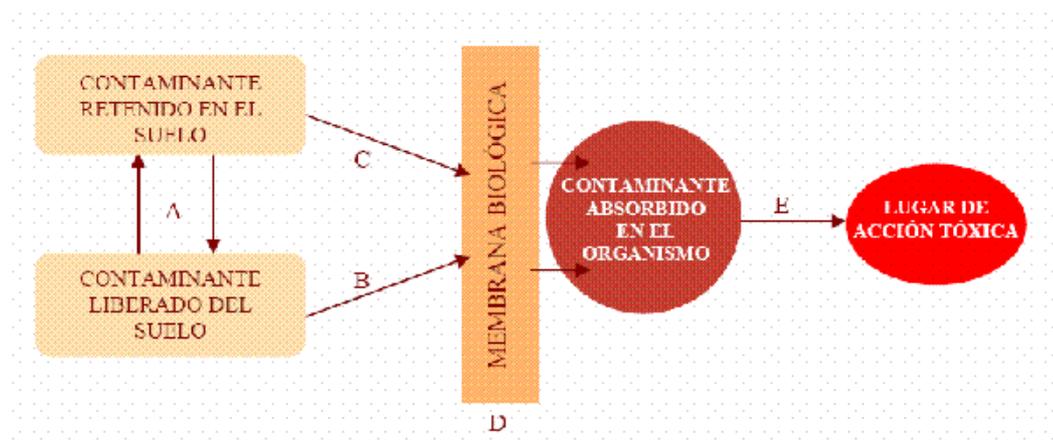


Figura 11.36. Esquema de los procesos que intervienen en la biodisponibilidad de un contaminante en el suelo. Modificado de Naidu et al., 2008.

A: Procesos físicos, químicos y bioquímicos implicados en la retención y solubilización del contaminante en el suelo.

B: Transporte de contaminantes solubles hacia las membranas biológicas donde pueden ser absorbidos.

C: Transporte de contaminantes retenidos sobre partículas sólidas.

D: Absorción del contaminante mediante procesos de difusión o transporte activo.

E: Órgano o tejido donde se metaboliza el contaminante o se ejerce la acción tóxica.

11.6.1. Factores que influyen en la biodisponibilidad de los elementos traza en el suelo.

En la toxicidad que pueden ejercer los elementos traza en el suelo, sobre la salud y los ecosistemas, intervienen numerosos factores y procesos que tienen lugar en el suelo. En general, la forma elemental y los sulfuros suelen ser menos solubles en los fluidos biológicos (Ruby et al., 1999) y por lo tanto, menos biodisponibles que los óxidos, hidróxidos o carbonatos del mismo metal, aunque existen excepciones como por ejemplo, la elevada biodisponibilidad (pulmonar y dérmica) del mercurio elemental, la baja solubilidad de los óxidos de níquel y del hidróxido de cromo.

El origen de la contaminación también influye en la biodisponibilidad del metal, así, cuando éste procede de actividades antrópicas su biodisponibilidad es mucho mayor (Naidu et al., 2001).

El tamaño de partícula es un factor importante que se debe considerar a la hora de realizar un estudio sobre la biodisponibilidad de un contaminante en el suelo; cuanto menor es el tamaño de partícula, mayor biodisponibilidad. Los métodos que evalúan la cantidad de metal que es liberado del suelo durante su paso por el estómago toman la fracción menor de 250 micras por considerar que las partículas menores a este tamaño son las que pueden quedar adheridas a la mano (Naidu et al., 2008).

Las características del suelo determinan los productos de las reacciones que tienen lugar en él. Así, el pH, el contenido en carbono orgánico total, el contenido en carbonato cálcico y las concentraciones de hierro y manganeso pueden ser indicativos de la biodisponibilidad de los metales en ese suelo.

En suelos ácidos (pH <5) se forman productos que serán más estables en las condiciones ácidas del estómago y por tanto, menos biodisponibles, mientras que los productos que se forman en suelos alcalinos (pH >8) suelen presentar mayor biodisponibilidad (Hamelink et al., 1994).

Muchos metales, entre ellos cadmio, plomo, mercurio y níquel, suelen asociarse a los carbonatos en suelos alcalinos, presentando mayor biodisponibilidad en la ruta de exposición oral (Reeder et al., 2006).

En los suelos con elevada cantidad de carbono orgánico total (COT >5-10%) los metales pueden estar complejados con la materia orgánica, presentando una elevada biodisponibilidad, como es el caso del plomo y mercurio (Kelley et al., 2002).

Los suelos con altas concentraciones de hierro y manganeso (>3-5 %) tienden a presentar baja biodisponibilidad, debido a los procesos de adsorción sobre las superficies de las partículas del suelo, sobre todo en el caso del arsénico.

11.6.2. Métodos para evaluar la biodisponibilidad relativa de metales pesados en el suelo.

11.6.2.1. Ensayos *in vivo*.

Los ensayos *in vivo* se basan en la administración de una dosis de sedimento/suelo contaminado a un animal para posteriormente determinar la concentración del metal en sangre, orina o en algún órgano, para así, y mediante una extrapolación, poder establecer la biodisponibilidad del metal en el ser humano. En la mayoría de los casos se trata de simular las condiciones gástricas de los niños entre uno y seis años, ya que son éstos los que presentan un mayor riesgo a la exposición e ingestión accidental de suelos contaminados (Juhász et al., 2007a).

11.6.2.2. Ensayos *in vitro*.

Los métodos *in vivo* con animales de ensayo ofrecen muy buenos resultados para poder evaluar la biodisponibilidad de los metales pesados en el suelo, sin embargo el tiempo y los gastos que requieren hacen que no sea posible su aplicación como una metodología rutinaria. Por ello, se han desarrollado ensayos *in vitro* mediante extracciones químicas que simulan las condiciones gastrointestinales del estómago en humanos y con las que se

determina la fracción bioaccesible. Cuando son aplicados apropiadamente, estos ensayos son un buen sustituto de la medida de la biodisponibilidad del metal en animales, además de ser rápidos y mucho más económicos que los ensayos *in vivo* (Juhasz et al., 2007b).

Son varios los factores a tener en cuenta en este tipo de extracciones:

- El medio de extracción debe simular los fluidos del tracto gastrointestinal, la temperatura debe mantenerse en 37°C, con el fin de mantener las condiciones fisiológicas.
- Los tiempos de extracción deben ser los mismos que los tiempos de residencia en los compartimentos del tracto gastrointestinal.
- La velocidad de mezcla debe ser constante.
- Mantener condiciones reductoras mediante el burbujeo de argón.
- Mantener constante el pH ($1,5 \pm 0,5$).

En estas extracciones se pone en contacto el sedimento con una disolución a pH ácido ($\approx 1,5$) y a 37 °C, en un periodo que simula el tiempo de residencia en el estómago. Transcurrido este periodo en el estómago, se eleva el pH hasta alcanzar la neutralidad, para simular las condiciones y el tiempo de permanencia en el intestino delgado. Para tal fin, se añaden enzimas y ácidos orgánicos para simular los fluidos gástricos e intestinales.

La fracción de metal que se disuelve durante la extracción estomacal e intestinal representa la fracción bioaccesible, es decir, la que es soluble y está disponible para ser absorbida. La fracción bioaccesible resultará generalmente mayor que la biodisponible, ya que no todo el metal que se solubiliza en el estómago es absorbido posteriormente a su paso por el intestino delgado.

Los métodos de extracción *in vitro* generalmente se basan en las condiciones gastrointestinales de los niños de entre uno a seis años en ayuno, simulando la peor situación posible, ya que en estas condiciones se alcanzan los valores más bajos de pH en el estómago y por tanto la cantidad de metal que se solubiliza en el estómago puede ser mayor (Intawongse y Dean, 2006).

11.6.3. Movilización de elementos traza en tracto gastrointestinal.

Para estudiar las diferencias de bioaccesibilidad se han seleccionado muestras representativas de los distintos grados de influencia de las balsas, es decir:

- Sedimento influido por balsas de estériles y sobre el que no ha tenido lugar una atenuación natural (contaminación primaria).
- Sedimento influido por las balsas, pero que aparece mezclado con las filitas del material circundante (contaminación secundaria)
- Sedimento que ha sufrido un proceso de granoselección por las corrientes marinas (contaminación secundaria).
- Sedimento influido por las balsas pero que aparece mezclado con materiales o aguas carbonatadas (contaminación terciaria).
- Sedimento no influido por la actividad minera, correspondiente a un suelo rojo típico de la zona.

Siguiendo el método anteriormente comentado, se tomaron alícuotas de la disolución, tras realizar la extracción en ambas etapas y se determinaron las concentraciones de plomo, cadmio, cinc, hierro y arsénico. (Tabla 11.25).

	Pb A	Pb N	Zn A	Zn N	Fe A	Fe N	Cd A	Cd N	As A	As N
	mg / kg									
No atenuado	568	154	3376	3695	317	91	13,4	8,9	4,5	2,7
Filitas	119	126	423	617	44	78	0,3	2,4	0,4	0,7
Granoselección	182	95	1301	1371	228	64	2,8	1,2	3	2,5
Carbonatos	388	106	497	706	145	69	6,1	2,5	4,8	3,5
No influencia	45	128	<ld	<ld	19	73	1,3	2,2	0,5	0,9

Tabla 11.25. Concentración de metales tras las etapas de digestión

A: etapa estomacal, ácida; N: etapa intestinal, neutra

También se ha determinado la fracción bioaccesible, representada por el porcentaje de extracción del metal con respecto al total en la fracción menor de 250 μm (Tabla 11.26).

Muestra	Pb A	Pb N	Zn A	Zn N	Fe A	Fe N	Cd A	Cd N	As A	As N
No atenuado	6	1,6	15,7	17,2	0,05	0,02	6,3	4,2	0,25	0,15
Filitas	0,6	0,6	6,8	9,9	0,01	0,03	1,3	10,3	0,04	0,07
Granoselección	0,9	0,5	1,5	1,6	1,1	0,05	0,4	0,2	0,02	0,02
Carbonatos	5,1	0,8	9,3	6,9	0,12	0,08	3,2	2,3	0,58	0,43
No influencia	26,6	75,6	-	-	0,01	0,02	8,7	15,2	0,45	0,8

Tabla 11.26. Fracción bioaccesible de los metales tras las dos etapas de digestión

A: etapa estomacal, ácida; N: etapa intestinal, neutra

En la extracción en medio ácido, estomacal, se obtuvieron concentraciones de elementos traza mayores que en la etapa intestinal, dada la mayor solubilidad que, generalmente suelen presentar en medio ácido estos elementos. No ocurre lo mismo con el cinc, que presenta valores similares en ambas extracciones.

En general, la bioaccesibilidad en condiciones que simulan el paso de los elementos traza por el intestino delgado es menor que en las condiciones del estómago, ya que parte del metal liberado en la etapa ácida puede formar complejos, adsorberse o precipitar al aumentar el pH en el intestino (Reeder et al., 2006).

Según el origen de cada muestra se observa que en el sedimento sin influencia minera los porcentajes de biodisponibilidad son mayores en la fase intestinal, ya que los elementos traza aparecen ligados a los óxidos de hierro, y éstos se atacan más en esta fase.

Por el contrario, en el sedimento mezclado con carbonatos los porcentajes de biodisponibilidad son más altos en medio estomacal, ácido, ya que los carbonatos se atacan en este medio liberando los elementos. Lo mismo ocurre con el sedimento de la Bahía de Portman sobre el que ha tenido lugar una granoselección, ya que en este punto es elevado el porcentaje de siderita, más atacable en medio estomacal que intestinal.

De todos ellos, el sedimento afectado por contaminación primaria es el que presenta los mayores porcentajes de biosiponibilidad.



12. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos, y expuestos en los capítulos anteriores, se pueden deducir las siguientes conclusiones:

1. En la zona de estudio, y como consecuencia de la actividad minera, se han detectado la existencia de:

- Focos de contaminación, siendo los más importantes:
 - Balsas de estériles de flotación, situadas en zonas topográficamente elevadas de la Sierra Minera.
 - Balsas de estériles de flotación formadas, por vertido directo al mar y depósito posterior de sedimentos en la playa por arrastre de las corrientes marinas, o bien por vertido directo en las proximidades del Mar Menor o del Mediterráneo.

- Vías de dispersión hídrica superficial, destacando:
 - Ramblas y ramblizos, principalmente.
 - A través de laderas.

Los materiales superficiales sufren alteración supergénica, liberando al medio gran cantidad de elementos traza y sulfatos, que por efecto de las lluvias torrenciales, son transportados, tanto en forma soluble como particulada.

El transporte más lejano de elementos traza tiene lugar en forma soluble por las aguas de lluvia, ya que durante los días de lluvia y siguientes, la parte particulada se deposita primero, continuando el frente de agua a mayor distancia del foco y llevando la carga soluble.

En aquellas zonas en las que los focos están situados en áreas próximas al mar, el transporte, tanto soluble como particulado, adquiere gran importancia.

Los flujos, solubles y particulados, que tienen lugar en la zona pueden resumirse en:

- Flujo de elementos traza desde la Sierra Minera y desde las balsas localizadas cerca del mar.
 - Flujo de elementos traza desde los suelos rojos circundantes.
 - Flujo de carbonatos (soluble y particulado) que actúan como atenuantes de la contaminación.
 - Flujo de partículas procedentes de suelos adyacentes.
 - Flujo de agua de mar, suministrando sales solubles y sodio.
- Los zonas de recepción de estos materiales son:
 - Cauces de las ramblas.
 - Suelos adyacentes a las balsas que reciben material contaminado directamente por escorrentía de ladera.
 - Suelos situados en los abanicos aluviales de las ramblas.
 - Mar Mediterráneo y Mar Menor.

Estos lugares, donde se deposita el material arrastrado, pueden actuar posteriormente como focos.

En estas zonas existen procesos de atenuación, que pueden ser debidos a:

- Mezcla con carbonatos o aguas carbonatadas.
- Mezcla con filitas u otras rocas encajantes.
- En el caso de vertido directo al mar, granoselección por arrastre de las partículas más finas y reactivas.

2. Los materiales superficiales están sufriendo un proceso de meteorización que da lugar a una serie de productos resultantes de la alteración supergénica final, entre otros, óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso, carbonatos, sulfatos hidratados y jarositas. Los procesos de oxidación-reducción, disolución, hidratación, evaporación y neutralización son los más influyentes en la movilización y dispersión actual de los elementos traza.

Los procesos que dan lugar a la movilización de contaminantes por las distintas vías en la Sierra Minera están activos, ya que los focos más importantes están desprovistos de vegetación y en zonas con fuertes pendientes, por lo que los procesos de erosión y transporte de materiales son muy importantes.

3. Los materiales quedan definidos a partir de su composición química y mineralógica en:

- Contaminación primaria:
 - Particulada: Son los materiales más reactivos, textura fina, y en cuya composición mineralógica aparecen jarositas, alunita y otros sulfatos como yeso, goldichita y hexahidrita. En general el pH de estos sedimentos es ácido. En aquellas situaciones en que la influencia marina ha sido importante, los valores de pH de los sedimentos superficiales pueden ser básicos. Además, la concentración de elementos traza es elevada.
 - Soluble: Las aguas de estos puntos presentan pH ácidos, elevados contenidos en elementos traza y otros iones, fundamentalmente sulfatos, que pueden precipitar como bianchita, coquimbita, halotrichita y siderotilo, aunque también cloruros, como la halita, polihalita y carnalita si el punto de muestreo está influido por el mar.

- Contaminación secundaria:
 - Particulado: en estos sedimentos ha tenido lugar una mezcla de los materiales contaminados con los de la roca encajante o con los materiales circundantes a las balsas, quedando parte de los elementos traza retenidos. Aunque ha tenido lugar una atenuación de la contaminación, los contenidos en elementos traza son elevados, así como en su composición mineralógica se cuantifican jarositas, alunita y otros sulfatos minerales, como yeso, goldichita y hexahidrita. A diferencia de los primeros, el porcentaje de feldespatos, cuarzo y filosilicatos es mayor. Los

valores de pH son superiores a los de los sedimentos afectados por contaminación primaria.

- Soluble: las aguas de escorrentía presentan menor cantidad de elementos traza solubles que los de contaminación primaria, y valores de pH cercanos a la neutralidad, pudiendo precipitar sales como la hexahidrita, yeso y halita.
- Contaminación terciaria:
 - Particulado: la influencia de las balsas de estériles de flotación es menor porque ha existido una mezcla con carbonatos, atenuantes de la contaminación. Estos sedimentos, por tanto, presentan en su composición mineralógica minerales carbonatados, calcita y dolomita fundamentalmente, por lo que sus valores de pH son básicos. En ellos, el porcentaje de jarositas y otros sulfatos minerales es menor.
 - Soluble: la presencia de carbonatos solubles en las aguas de escorrentía favorece que los elementos traza precipiten formando carbonatos y/o hidróxidos, por lo que las concentraciones de elementos traza solubles son bajas y los pH neutros o ligeramente alcalinos.
- Origen diferente:
 - Particulado: en general, se trata de suelos rojos, en los que los niveles de elementos traza se deben a valores geogénicos, propios de la zona. En su composición mineralógica tienen relevancia los óxidos de hierro y aluminio y los silicatos y feldespatos.
 - Soluble: las aguas de escorrentía de estos puntos llevan menor carga soluble que los influidos por la actividad minera.

4. La movilización natural de elementos traza se produce en función de la mineralogía y pH del suelo, y tiene lugar principalmente en forma de fases solubles, tanto sulfatos anhidros como hidratados. Se confirma que en estas condiciones los elementos más móviles son, en orden, cadmio, manganeso, cinc

y cobre, mientras que los menos móviles son plomo, arsénico y hierro. La asociación de elementos traza a carbonatos supone una disminución de la movilización natural, y por tanto una atenuación natural.

5. El estudio de movilización potencial conduce a las siguientes conclusiones:

- La mayor movilización potencial de elementos traza se da en medio ácido, en el que se movilizan los sulfatos hidratados, el yeso, las jarositas de baja cristalinidad y carbonatos (la siderita no se ataca en su totalidad), siendo los elementos más móviles, en orden, plomo > cadmio > cinc > manganeso, y los menos móviles cobre > hierro > arsénico.

Podemos concluir que la problemática de las aguas de escorrentía y de drenaje ácido de mina es importante en los sedimentos estudiados, sobre todo en los afectados por contaminación primaria, ya que al aparecer la mayor movilidad en medio ácido, cada uno de los puntos puede volver a actuar como foco nuevamente al recibir dichas aguas.

- La movilización en medio oxidante es algo menor que en medio ácido, aunque similar, ya que el contenido en materia orgánica y sulfuros es escasa. Con esta extracción se movilizan sulfuros, sulfatos hidratados, el yeso, las jarositas de bajo grado de cristalinidad y en parte los carbonatos. El orden de movilidad en esta extracción es similar al obtenido en la extracción con ácido nítrico.
- En medio complejante-reductor se movilizan además de los componentes amorfos, los sulfatos hidratados, el yeso, jarositas y hematites de baja cristalinidad, y, en parte, carbonatos, siendo el orden de movilidad cadmio, hierro, manganeso, arsénico, cobre y plomo. En aquellas zonas donde se encuentran sedimentos afectados por contaminación primaria, un cambio de las condiciones a reductoras y con elevado porcentaje de materia orgánica, la movilización de elementos puede ser importante.

6. En función de los resultados obtenidos al aplicar los bioensayos puede concluirse que es recomendable utilizar más de un bioensayo, una batería de test, para minimizar los errores a la hora de caracterizar los focos y los procesos de atenuación natural de la contaminación.

Con la batería de test aplicada se ha podido realizar una clasificación de los puntos en función de su toxicidad creciente, que coincide con la realizada en la caracterización química y mineralógica realizada en los materiales y las aguas.

Al aplicar estos bioensayos se caracterizan los focos de contaminación así como se concluye que la atenuación por mezcla con materiales o aguas carbonatadas es más efectiva que su mezcla con filitas.

7. El estudio de la transferencia de metales traza a vegetales que crecen de manera natural en el área de estudio, permite concluir que las especies seleccionadas son tolerantes a los elementos traza. Además, *Dittrichia viscosa* es hiperacumuladora de cadmio, *Zygophyllum fabago* lo es de hierro y *Arthrocnemum macrostachyum* de hierro, arsénico y manganeso.

8. La fracción bioaccesible de metal pesado vía ingesta en la etapa estomacal es mayor que en la intestinal, excepto para el cinc, que son similares. El orden es cinc, cadmio, plomo, cobre y arsénico. Las mayores concentraciones se dan en los sedimentos afectados por contaminación primaria.



13. BIBLIOGRAFÍA

- Aceró, P., Ayora, C., Torrentó, C. y Nieto, J.M. (2006). The behaviour of trace elements during schwertmannite precipitation and subsequent transformation into goethite and jarosite. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70: 4130-4139.
- Adriano, D.C. (2001) Trace elements in terrestrial environments: Biogeochemistry, bioavailability and risks of metals. 2ª Edición. Springer-Verlag, New York, pp.866.
- Agunbiade, F.O., Olu-Owalabi, B.I. y Adebowale, K.O. (2009). Phytoremediation potential of *Eichornia crassipes* in metal-contaminated coastal water. *Bioresource Technology* 100: 4521-4526.
- Albanese, S., De Vivo, B., Lima, A. y Cicchella, D. (2007). Geochemical background and baseline values of toxic elements in stream sediments of Campania region (Italy). *Journal of Geochemical Exploration* 93: 21-34.
- Alcaraz Ariza, F.J. (1999). Manual de teoría y prácticas de geobotánica. Diego Marín, Murcia, 401pp.
- Alcaraz Ariza, F.J., Sánchez-Gómez, P. y Correal, E. (1989). Catálogo de las plantas aromáticas, condimentarias y medicinales de la Región de Murcia. Instituto Nacional de Investigaciones agrarias, INIA nº 67, Madrid.
- Alloway, B.J. (2003). Contaminación y recuperación de suelos. En: El medio ambiente. Introducción a la química medioambiental y a la contaminación. (Ed.) R.M. Harrison. Acribia, Zaragoza, 461pp.
- Alloway, B.J. (1997). The mobilization of trace elements in soils. En: Contaminated soils. 3rd International conference on the biogeochemistry of trace elements. (Ed.) INRA. Paris, 525pp.
- Alloway, B.J. (1995). The origins of heavy metals in soils. En: Heavy Metals in Soils. (Ed.) B.J. Alloway. Blackie Academic and Professional Publisher, New York, 368pp.

- Álvarez, E., Fernández, M.L., Vaamonde, C. y Fernández, M.J. (2003). Heavy metals in the dump of an abandoned mine in Galicia (NW, Spain) and in the spontaneously occurring vegetation. *Science of the Total Environment* 313: 185-197.
- Anne, P. (1945). Dosage rapide du carbone organique des sols. *Annales d'Agronomie* 2: 162-172.
- Arana, R. y Pérez-Sirvent, C. (1981). Estudio mineralógico de unas escorias romanas del horno de Herrerías (Mazarrón, Murcia). *Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía* 5: 15-27.
- 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* 2: 403-414.
- AutoCAD, (2006). Autodesk Inc, Barcelona. <http://www.autodesk.es>.
- Azur Environmental, (1998). Microtox manual. <http://www.azurenv.com>.
- Baker, A.J.M. y Brooks, R.R. (1989). Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements: a review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery* 1: 811-826.
- Ballester Sabater, R. (2003). El componente vegetal en los humedales de la región de Murcia: catalogación, evaluación de la rareza y propuestas de medidas para su conservación. Consejería de Agricultura, Agua y Medio Ambiente, Murcia, 115pp.
- Barahona, E. (1974). Arcillas de ladrillería de la provincia de Granada: evaluación de algunos ensayos de materias primas. Tesis Doctoral. Universidad de Granada.
- Bradshaw, P.M.D., Clews, D.R. y Walter, J.L. (1972). Exploration geochemistry: A series of seven articles reprinted from Mining Canada and Canadian Mining Journal. Barringer Research Ltd., Ontario, 49pp.
- Brantley, S.L., Goldhaber, M.B. y Ragnarsdottir, K.V. (2007). Crossing disciplines and scales to understand the critical zone. *Elements* 3, 307-314.

- Boluda, R., Quintanilla, J.F., Bonilla, J.A., Sáez, E. y Gamón, M. (2002). Application of the Microtox® test and pollution indices to the study of water toxicity in the Albufera Natural Park (Valencia, Spain). *Chemosphere* 46: 355-369.
- Brunner, I., Luster, J., Günthardt-Goerg, M.S. y Frey, B. (2008). Heavy metal accumulation and phytostabilisation potential of tree fine roots in a contaminated soil. *Environmental Pollution* 152: 559-568.
- Buckby, T., Black, S., Coleman, M.L. y Hodson, M.E. (2003). Fe-sulphate-rich evaporative mineral precipitates from the Río Tinto, Southwest Spain. *Mineralogical Magazine* 67:263-278.
- Cao, A., Cappai, G., Carucci, A. y Lai, T. (2008). Heavy metal bioavailability and chelate mobilization efficiency in an assisted phytoextraction process. *Environmental Geochemistry and Health* 30: 115-119.
- CARM, (2004). Ortomosaico QuickBird de la Región de Murcia. Dirección general del Medio Natural, Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.
- Centro Regional de Estadística de Murcia, (2006). Anuario estadístico de la Región de Murcia. Tomo I: Datos regionales. 2005-2006. Dirección General de Economía y Estadística. CARM.
- Centro Regional de Estadística de Murcia, (2005). Anuario estadístico de la Región de Murcia. Tomo I: Datos regionales. 2004-2005. Dirección General de Economía y Estadística. CARM.
- Centro Regional de Estadística de Murcia, (2004). Anuario estadístico de la Región de Murcia. Tomo I: Datos regionales. 2003-2004. Dirección General de Economía y Estadística. CARM.
- Centro Regional de Estadística de Murcia, (2003). Anuario estadístico de la Región de Murcia. Tomo I: Datos regionales. 2002-2003. Dirección General de Economía y Estadística. CARM.

- Centro Regional de Estadística de Murcia, (2002). Anuario estadístico de la Región de Murcia. Tomo I: Datos regionales. 2001-2002. Dirección General de Economía y Estadística. CARM.
- Centro Regional de Estadística de Murcia, (2001). Anuario estadístico de la Región de Murcia. Tomo I: Datos regionales. 2000-2001. Dirección General de Economía y Estadística. CARM.
- Centro Regional de Estadística de Murcia, (2000). Anuario estadístico de la Región de Murcia. Tomo I: Datos regionales. 1999-2000. Dirección General de Economía y Estadística. CARM.
- Chapman, P.M., Ho, K.T., Munns, W.R., Soloman, K. y Weinstein, M.P. (2002). Issues in sediment toxicity and ecological risk assessment. *Marine Pollution Bulletin* 44: 271-278.
- Chial Belgis, Z., Persoone, G. y Blaise, C. (2003). Cyst-based toxicity tests XVI-sensitivity comparison of the solid phase *Heterocypris incongruens* microbiotest with the *Hyalella azteca* and *Chironomus riparius* contact assays on freshwater sediments from Peninsula Harbour (Ontario,Canada). *Chemosphere* 52: 95-101.
- Chopin, E.I.B. y Alloway, B.J. (2007). Distribution and mobility of trace elements in soils and vegetation around the mining and smelting areas of Tharsis, Riotinto and Huelva, Iberian Pyrite Belt, SW Spain. *Water, Air and Soil Pollution* 182: 245-261.
- Chopin, E.I.B., Black, S., Hodson, M.E., Coleman, M.L. y Alloway, B.J. (2003). A preliminary investigation into mining and smelting impacts on trace element concentrations in the soils and vegetation around Tharsis, SW Spain. *Mineralogical Magazine* 67 (2): 279-288.
- Chung, M.K., Hu, R. y Wong, M.H. (2007). Comparative toxicity of hydrophobic contaminants to microalgae and higher plants. *Ecotoxicology* 16: 393-402.
- Concas, A., Ardau, C., Cristini, A., Zuddas, P. y Cao, G. (2006). Mobility of heavy metals from tailings to stream waters in a mining activity contaminated site. *Chemosphere* 63: 244-253.

- Conesa, H.M., Robinson, B.H., Schulin, R. y Nowack, B. (2007a). Growth of *Lygeum spartum* in acid mine tailings: response of plants Developer from seedlings, rhizomes and t field conditions. *Environmental Pollution* 145: 700-707.
- Conesa, H.M., García, G., Faz, A. y Arnaldos, R. (2007b). Dynamics of metal tolerant plant communities' development in mine tailings from the Cartagena-La Unión Mining District (SE Spain) and their interest for further revegetation purposes. *Chemosphere* 68: 1180-1185.
- 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, Murcia. Consejería de Medio Ambiente. Plan Forestal Andaluz. Junta de Andalucía. Sevilla.
- Cosgrove, M.E. y Sulaiman, A.M.A. (1973). A rapid method for the determination of quartz in sedimentary rocks by X-Ray diffraction incorporating mass absorption correction. *Clay Minerals* 10: 51-55.
- Courtin-Nomade, A., Grosbois, C., Bril, H. y Roussel, C. (2005). Spatial variability of arsenic in some iron-rich deposits generated by acid mine drainage. *Applied Geochemistry* 20: 383-396.
- Covelli, S., Faganeli, J., Horvat, M. y Brambati, A. (2001). Mercury contamination of coastal sediments as the result of long-term cinnabar mining activity (Gulf of Trieste, northern Adriatic sea). *Applied Geochemistry* 16: 541-558.
- Cui, S., Zhou, Q. y Chao, L. (2007). Potential hyperaccumulation of Pb, Zn, Cu and Cd in enduring plants distributed in an old smeltery, northeast China. *Environmental Geology* 51: 1043-1048.
- Davoren, M., Shúilleabháin, S.N., Halloran, J.O., Hartl, M.G.J., Sheehan, D., O'Brien, N.M., Van Pelt, F.N.A.M. y Mothershill, C. (2005). A test battery approach for the ecotoxicological evaluation of estuarine sediments. *Ecotoxicology* 14: 741-755.
- Dean, J.R. (2003). *Methods for Environmental Trace Analysis*. John Wiley and Sons, New York, 259pp.

- De Vivo, B., Belkin, H.E. y Lima, A. (2008). *Environmental Geochemistry: Site characterization, data analysis and case histories*. Elsevier, Amsterdam, 429pp.
- Devesa-Rey, R., Moldes, A.B., Díaz-Fierros, F. y Barral, M.T. (2008). Toxicity of Anllóns river sediment extracts using Microtox and the Zucconi phytotoxicity test. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 80: 225-230.
- Di Bonito, M. (2005). Trace elements in soil pore water. A comparison of sampling methods. Tesis Doctoral. Universidad de Nottingham.
- Dirección General del Medio Natural, Región de Murcia, (1998). Parque minero y ambiental Cabezo Rajao, una propuesta para su recuperación. Ouverture Project: Green Actino II. Consejería de Agricultura, Agua y Medio Ambiente.
- Dold, B., Wade, C. y Fontboté, L. (2009). Water management for acid mine drainage control at the polymetallic Zn-Pb-(Ag-Bi-Cu) deposit Cerro de Pasco, Peru. *Journal of Geochemical Exploration* 100: 133-141.
- Duchaufour, P. (1970). *Précis de Pedologie*. Masson & Cie. París, 481pp.
- Duran, J.J., García de Domingo, A. y López-Geta, J.A. (2003). Hydrogeological characterization of the Spanish wetlands included in the Ramsar Convection. Mapa 1: 2500000.
- El Khalil, H., El Hamiani, O., Bitton, G., Ouazzani, N. y Boularbah, A. (2008). Heavy metal contamination from mining sites in South Morocco: Monitoring metal content and toxicity of soil runoff and groundwater. *Environmental Monitoring and Assessment* 136: 147-160.
- España, J.S., Pamo, E.L., Pastor, E.S., Andrés, J.R. y Rubí, J.A.M. (2005). The natural attenuation of two acidic effluents in Tharsis and La Zarza-Perrunal mines (Iberian Pyrite Belt, Huelva, Spain). *Environmental Geology* 49: 253-266.
- ESRI, (2007). ArcGIS 9.3. <http://www.esri.com>.
- FAO, (1977). Guía para la descripción de perfiles de suelos. Roma, 70pp.

- FAO-UNESCO, (1988). Soils map of the world: revised legend. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 119pp.
- FAO-UNESCO, (1974). Soil map of the world. Volumes 1-10. Food and Agriculture Organization of the United Nations and UNESCO, Paris. 1:5000000.
- Farmer, J.G. y Graham, M. (2003). Aguas dulces. En: El medio ambiente. Introducción a la química medioambiental y a la contaminación. (Ed.) R.M. Harrison. Acribia, Zaragoza, 461pp.
- Fellet, G., Marchiol, L., Perosa, D. y Zerbi, G. (2007). The application of phytoremediation technology in a soil contaminated by pyrite cinders. *Ecological Engineering* 31: 207-214.
- Fernandes, J.A. y Maldonado, J.M. (2000). Absorción y transporte de nutrientes minerales. En: Fundamentos de Fisiología Vegetal. (Ed.) J. Azcón-Bieto y M. Talón. Mc Graw-Hill/Interamericana, Barcelona, 109pp.
- Fernández Caliani, J.C. (2008). Una aproximación al conocimiento del impacto ambiental de la minería en la Faja pirítica Ibérica. *Macla* 10: 24-28.
- Fernández Caliani, J.C. (2003). Drenaje ácido de minas: Aspectos geoquímicos y mineralógicos. En: Mineralogía aplicada. (Ed.) E. Galán. Síntesis, Madrid. pp: 251-265.
- Ferrier, G., Hudson-Edwards, K.A. y Pope, R.J. (2008). Characterisation of the environmental impact of the Rodalquilar mine, Spain by ground-based reflectance spectroscopy. *Journal of Geochemical Exploration* 100: 11-19.
- Figueiras, A.V., Lavilla, I. y Bendicho, C. (2002). Chemical sequential extraction for metal partitioning in environmental solid samples. *Journal of Environmental Monitoring* 4: 823- 857.
- Filipek, L.H. y Plumlee, G.S. (1999). The environmental geochemistry of mineral deposits. Part B: case studies and research topics: Society of Economic Geologists, Inc., Reviews in Economic Geology, 6B: 210 pp.

- Fischerová, Z., Tlustos, P., Száková, J. y Sichorova, K. (2006). A comparison of phytoremediation of selected plant species for given trace elements. *Environmental Pollution* 144: 93-100.
- Fornes, F., García de la Fuente, R., Belda, R.M y Abad, M. (2009). Alperujo compost amendment of contaminated calcareous and acidic soils: Effects on growth and trace element uptake by five *Brassica* species. *Bioresource Technology* 100: 3982-3990.
- Fukushi, K., Sasaki, M., Sato, T., Yanase, N., Amano, H. e Ikeda, H. (2003). A natural attenuation of arsenic in drainage from an abandoned mine dump. *Applied Geochemistry* 18: 1267-1278.
- Fundación Sierra Minera, (2001). Medio ambiente y empleo en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión. Fundación Sierra Minera, 256pp.
- Galán Huertos, E. y Romero Baena, A. (2008). Contaminación de suelos por metales pesados. *Macla* 10, 48-60.
- García García, C. (2004). Impacto y riesgo ambiental de los residuos minero-metalúrgicos de la Sierra de Cartagena- La Unión (Murcia, España). Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cartagena (Murcia).
- García-Lorenzo, M.L., Martínez-Sánchez, M.J., Pérez-Sirvent, C. y Molina J. (2009). Ecotoxicological evaluation for the screening of areas polluted by mining activities. *Ecotoxicology*, DOI 10.1007/s10646-009-0362-x.
- García Lorenzo, M.L. (2004). Bioensayo de toxicidad por Microtox® en sedimentos mineros estabilizados con CaCO₃. Proyecto Fin de Carrera. Universidad de Murcia.
- García Tortosa, F.J., 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.
- Garrido Medina, M.M. (2002). Aportaciones a la especiación de Fe (II) y Fe (III) en medio sulfúrico. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia.

- Gérard, E., Echevarria, G., Morel, C., Sterckeman, T. y Morel, J.L. (2001). Isotopic exchange kinetics method for assessing cadmium availability in soils. En: Trace elements in soil. Bioavailability, flux and transfer. (Eds.) I.K. Iskandar y M.B. Kirkham. CRC Press, 287pp.
- Ginzburg, I.I. (1960). Principles of geochemical prospecting. Pergamon Press. Oxford, 311pp.
- Gleisner, M., Herbert, R.B. y Frogner P.C. (2006). Pyrite oxidation by *Acidithiobacillus ferrooxidans* at various concentrations of dissolved oxygen. *Chemical Geology* 225: 16-29.
- Gonzaga, M.I.S., Santos, J.A.G. y Ma, L.Q. (2006). Arsenic chemistry in the rhizosphere of *Pteris vittata* L. and *Nephrolepis exaltata* L. *Environmental Pollution* 143: 254-260.
- González-Díaz, I., López-Pérez, M. y Romero Baena, A. 2008. Problemática de los suelos afectados por la explotación de sulfuros. *Macla* 10: 61-75.
- Gruiz, K. (2005). Soil testing triad and interactive ecotoxicity tests for contaminated soil. En: Soil remediation series nº 6. (Eds.) F. Fava y P. Canepa. INCA. Venice, pp: 45-70.
- Gustavsson, N., Bolviken, B., Smith, D.B. y Severson, R.C. (2001). Geochemical landscapes of the conterminous United States- New map presentation for 22 elements. U.S Geological Survey Professional Paper 1648, 38pp.
- Hamelink, J.L., Landrum, P.F., Bergman, H.L. y Benson, W.H. (1994). Bioavailability: Physical, chemical, and biological interactions. SETAC Special Publication, CRC Press, Boca Raton, Florida, 239pp.
- Higueras, P. y Oyarzun, R. (2002). Minería y Medio Ambiente. Universidad de Castilla-La Mancha. <http://www.uclm.es/users/higueras/MAM/InicioMAM.htm>.
- Hulsemann, J. (1966). An inventory of marine carbonate materials. *Journal of Sedimentary Petrology* 36:622-625.

- IGME, (1999). Atlas del medio natural de la Región de Murcia.
- Inouye, S. (1994). NAD(P)H-flavin oxidoreductasa from the bioluminescent bacterium *Vibrio fischeri* ATCC 7744, is a flavoprotein. *FEBS Letters* 347: 163-168.
- Intawongse, M. y Dean, J.R. (2006) *In vitro* testing for assessing oral bioaccessibility of trace metals in soil and food samples. *Trends in Analytical Chemistry* 25: 876-886.
- ISO, (1995). Water quality sampling-Part 12: Guidance on sampling of bottom sediments. ISO 5667-12:1995.
- Jambor, J.L., Nordstrom, D.K. y Alpers, C.N. (2000). Metal-sulfate salts from sulfide mineral oxidation. En: Sulfate Minerals. Crystallography, geochemistry, and environmental significance, Reviews in mineralogy and geochemistry. (Eds.) C.N. Alpers, J.L. Jambor y D.K. Nordstrom. Mineralogical Society of America, Washington, DC. pp: 303-350.
- J.C.P.D.S (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) (1980). Mineral powder diffraction file. Search Manual. J.C.P.D.S. 484 pp.
- Jönsson, J., Jönsson, J. y Lövgren, L. (2006). Precipitation of secondary Fe (III) minerals from acid mine drainage. *Applied geochemistry* 21: 437-455.
- Juhasz, A.L., Smith, E., Weber, J., Rees, M., Rofe, A., Kuchel, T., Sansom, L. y Naidu, R. (2007a). Comparison of *in vivo* and *in vitro* methodologies for the assessment of arsenic bioavailability in contaminated soils. *Chemosphere* 69: 961-966.
- Juhasz, A.L., Smith, E., Weber, J., Rees, M., Rofe, A., Kuchel, T., Sansom, L. y Naidu, R. (2007b). *In vitro* assessment of arsenic bioaccessibility in contaminated (anthropogenic and geogenic) soils. *Chemosphere* 69: 69-78.
- Kabata-Pendias, A. y Pendias, H. (1992). Trace elements in soils and plants. 2ª edición. CRC Press, Boca Raton, Florida, 365pp.
- Kabata-Pendias, A. (2001). Trace elements in soils and plants. 3ª Edición. CRC Press, Boca Raton, Florida, 411pp.

- Karathanasis, A.D. y Harris, B.F. (1994). Quantitative thermal analysis of soil materials. En: Quantitative methods in soil mineralogy. (Eds.) J.E. Amonette, y L.W. Zelazny. Soil Science Society of America, 462pp.
- Kelley, M.E., Brauning, S.E., Schoof, R.A. y Ruby, M.V. (2002). Assessing oral bioavailability of metals in soil. Battelle Press, Columbia, Ohio, 124pp.
- Kohfahl, C., Brown, P.L., Linklater, C.M., Mazur, K., Irannejad, P. y Pekdeger, A. (2008). The impact of pyrite variability, dispersive transport and precipitation of secondary phases on the sulphate release due to pyrite weathering. *Applied Geochemistry* 23: 3783-3798.
- Lapakko, K. (2002). Metal mine rock and waste characterization tools: an overview. *Mining, Minerals and Sustainable Development* 67: 31pp.
- LeDuc, D.L. y Terry, N. (2005). Phytoremediation of toxic trace elements in soil and water. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology* 32: 514-520.
- Lee, S., Lee, B., Kim, J. y Lee, J. (2006). Human risk assessment for heavy metals and As contamination in abandoned metal mine areas, Korea. *Environmental Monitoring and Assessment* 119: 233-244.
- Leitgib, L., Kálmán, J. y Gruiz, K. (2007) Comparison of bioassays by testing whole soil and their water extract from contaminated sites. *Chemosphere* 66: 428-434.
- Ley 10/1998, de 21 de abril de Residuos.
- Lillo Carpio, M. y Rodríguez Estrella, T. (1996). Aspectos sobre la geomorfología del valle y ensenada de Escombreras (Murcia). *Papeles de Geografía* 23-24: 193-210.
- Lin, J.W., Chao, Y.F. y Weng, S.F. (1993). Nucleotide sequence of the luxC gene encoding fatty acid reductase of the lux operon from *Photobacterium leiognathi*. *Biochemical and Biophysical Research Communications* 191: 314-318.
- Lindsay, W.L. y Norvell, W.A. (1978). Development of a DTPA test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Science Society of America Journal* 42: 421-428.

- López Aguayo, J.A. y Arana Castillo, R. (1992). Etapas finales de la alteración supergénica de sulfuros. En: Recursos Minerales de España. (Eds.) J. García Guinea y J. Martínez Frías. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, 1448pp.
- López-Julián, P.L. y Mandado-Collado, J.M. (2002). Extracciones químicas secuenciales de metales pesados. Aplicación en ciencias geológicas. *Estudios Geológicos* 58: 133-144.
- Lottermoser, B. (2007). Mine Wastes. Characterization, treatment and environmental impacts. 2ª Edición. Springer, Berlin, 304pp.
- Manteca, J.I. y Ovejero, G. (1992). Los yacimientos de Zn, Pb, Ag-Fe del distrito minero La Unión-Cartagena. En: Recursos minerales de España. (Eds.) J. García Guinea, y J. Martínez Frías. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, 1448pp.
- Mapa Digital de Suelos de la Región de Murcia, (1999). Proyecto Sistemas de Información Ambiental. Consejería de Agricultura, Agua y Medio Ambiente. Dirección General del Medio Natural. Región de Murcia. Escala 1:100000.
- Martens, D.C. y Lindsay, W.L. (1990). Testing soils for Copper, Iron, Manganese, and Zinc. En: Soil testing and plant analysis. (Ed.) R.L. Westerman. Soil Science Society of America, Madison, pp: 229-264.
- Martín, D. (2004). Qualitative, quantitative and microtextural powder X-Ray diffraction analysis. <http://www.xpowder.com>.
- Martín Pozas, J.M., Rodríguez Gallego, M. y Martín Vivaldi, J.L. (1969). Análisis cuantitativo de filosilicatos de las arcillas por difracción de Rayos X. Influencia del catión de cambio sobre la intensidad de la reflexiones. *Anales de la Real Sociedad Española de Física y Química*, Serie B.L.V: 109-112.
- Martín Vivaldi, J.L., Rodríguez Gallego, M. y Martín Pozas, J.M. (1968). Análisis cuantitativo de filosilicatos de la arcilla por difracción de Rayos X para el estudio de la orientación preferente. *Anales de la Real Sociedad Española de Física y Química* 64: 101-105.

- Martínez-Sánchez, M.J., Pérez Sirvent, C., Tudela Serrano, M.L., Molina Ruiz, J., Mantilla, W., Linares Moreno, P., Agudo Juan, I., Banegas García, A., García-Lorenzo, M.L., Hernández-Pérez, C., Martínez-Martínez, L.B. y Martínez-Pujante, M.J. (2008a). Puesta en marcha de una plataforma de servicios para la lucha contra la sequía y la desertificación en la región mediterránea europea a través de un sistema de acciones piloto locales. *DESERTNET 2*.
- Martínez-Sánchez, M.J., Pérez Sirvent, C., Tudela Serrano, M.L., Molina Ruiz, J., Mantilla, W., Linares Moreno, P., Agudo Juan, I., Banegas García, A., García-Lorenzo, M.L. González-Ciudad, E., Martínez-López, S., Martínez-Martínez, L.B., Navarro Hervás, M.C., Pérez-Espinosa, V., Hernández-Córdoba, M. y López-García, I. (2008b). Delimitación de la zona de influencia minera y modelo de dispersión de metales pesados en el Campo de Cartagena. Fundación cluster para la protección y conservación del Mar Menor.
- Martínez-Sánchez, M.J., Pérez Sirvent, C., Tudela Serrano, M.L., Molina Ruiz, J., Mantilla, W., Linares Moreno, P., García-Lorenzo, M.L. Tovar Frutos, P.J., Hernández-Córdoba, M., López-García, I., Barba, A., Oliva, J., Pérez-Ruzafa, A. y Marcos Diego, C. (2008c). Fuentes contaminantes en el Mar Menor y Campo de Cartagena. Fundación cluster para la protección y conservación del Mar Menor.
- Martínez-Sánchez, M.J., Pérez-Sirvent, C., Agudo Juan, I., Banegas, A., García-Lorenzo, M.L., González-Ciudad, E., Linares Moreno, P., Mantilla, W., Martínez-López, S., Martínez-Martínez, L.B., Molina-Ruiz, J., Pérez-Espinosa, V., Sánchez-Peñaranda, M.J., Tudela Serrano, M.L. y Veiga del Baño, J.M. (2008d). Propuesta para la realización del proyecto piloto de recuperación de los suelos contaminados de la Bahía de Portman.
- Martínez-Sánchez, M.J., García-Lorenzo, M.L., Pérez-Sirvent, C. y Marimon, J. (2008e). Use of marble cutting sludges to immobilize heavy metals and decrease toxicity of contaminated soils. *Fresenius environmental Bulletin* 17: 1672-1678.
- Martínez-Sánchez, M.J., Navarro, M.C., Pérez-Sirvent, C., Marimón, J., Vidal, J., García-Lorenzo, M.L. y Bech, J. (2008f). Assessment of the mobility of metals in a mining-impacted coastal area (Spain, Western Mediterranean). *Journal of Geochemical Exploration* 96: 171-182.

- Martínez-Sánchez, M.J. Pérez-Sirvent, C., Tudela Serrano, M.L., Molina Ruiz, J., Mantilla, W., Hernández Córdoba, M., López García, I., García Lorenzo, M.L., Linares Moreno, P., Agudo Juan, I., Banegas García, A., Barberán Murcia, R., Carrillo Ortuño, M.D., Hernández Pérez, C., Marimón Santos, J., Martínez Pujante, M.J., Navarro Hervás, M.C., Solano Marín, A.M., Tovar Frutos, P. y Vidal Otón, J. (2007). Niveles de fondo y niveles genéricos de referencia de metales pesados en suelos de la Región de Murcia. Consejería de Desarrollo sostenible y Ordenación del territorio, Murcia. 304pp.
- Martínez-Sánchez, M.J., Pérez-Sirvent, C., Tudela Serrano, M.L., Molina Ruiz, J., Linares Moreno, P., Navarro Hervás, C., Vidal Otón, J., Barberán Murcia, R., Mantilla, W., Tovar Frutos, P.J., Solano Marín, A.M., Marimon Santos, J., Agudo Juan, I. y Hernández-Pérez, C. (2005). Desertificación: Monitorización mediante indicadores de degradación química. Programa de iniciativa comunitaria INTERREG IIIB ESPACIO MEDOCC. Proyecto Desertnet. Acción piloto de la Región de Murcia. Consejería de Agricultura, Agua y Medio Ambiente, 222pp.
- McClenaghan, M.B., Bobrowsky, P.T., Hall, G.E.M. y Cook, S.J. (2001). Drift exploration in glaciated terrain. The Geological Society, London, 350pp.
- McIntyre, T. (2003). Phytoremediation of heavy metals from soils. *Advances in Biochemical Engineering Biotechnolgy* 78: 153-162.
- Mehra, O.P. y Jackson, M.L. (1960). Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clay Minerals Bulletin* 7: 317-327.
- Mellinger, M. (1979). Quantitative X-ray diffraction analysis of clay mineral: an evaluation. Saskatchewan Res. Council, Canada, SRC Report 6: 1-46.
- Mlayah, A., Ferreira da Silva, E., Rocha, F., Ben Hamza, C., Charef, A. y Noronha, F. (2009). The Oued Mellegue: Mining activity, stream sediments and dispersion of base metals in natural environments, North-western Tunisia. *Journal of Geochemical Exploration* 102: 27-32.
- Molina Ruiz, J. (2000). Minimización de impactos ambientales en la minería de la roca ornamental en la Región de Murcia. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia.

- Montero, I.C., Brimhall, G.H., Alpers, C.N. y Swayze, G.A. (2005). Characterisation of waste rock associated with acid drainage at the Penn Mine, California, by ground-based visible to short-wave infrared reflectance spectroscopy assisted by digital mapping. *Chemical Geology* 215: 453-472.
- Moore, J.N. y Luoma, S.N. (1990). Hazardous wastes from large-scale metal extraction. *Environmental Science and Technology* 24: 1278-1285.
- Moreno Grau, M.A. (2003). Toxicología Ambiental. Evaluación de riesgo para la salud humana. (Ed.) A. García Brage, McGraw-Hill. 384pp.
- Muller, G. y Gatsner, M. (1971). Chemical analysis. *Neues Jahrbuch fur Mineral Monatshefte* 10: 466-469.
- Munsell, (1992). Soil Color Charts. Newbuurgh, Nueva York.
- Murciego Murciego, A., García Sánchez, A., Rodríguez González, M.A., Pinilla Gil, E., Toro Gordillo, C., Cabezas Fernández, J. y Buyolo Triguero, T. (2007). Antimony distribution and mobility in topsoils and plants (*Cytisus striatus*, *Cister ladanifer* and *Dittrichia viscosa*) from polluted Sb-mining areas in Extremadura (Spain). *Environmental Pollution* 145: 15-21.
- Naidu, R., Semple, K.T., Megharaj, M., Juhasz, A.L., Bolan, N.S., Gupta, S., Clothier, B., Schulin, R. y Chaney, R. (2008). Bioavailability, definition, assessment and implications for risk assessment. En: Chemical bioavailability in terrestrial environments. (Ed.) R. Naidu. Elsevier, Amsterdam, pp: 39-52.
- Naidu, R., Krishnamurti, G.S.R., Wenzel, W., Megharaj, M. y Bolan, N.S. (2001). Heavy metal interactions in soils and implications for soil microbial biodiversity. En: Metals in the environment. Analysis and biodiversity. (Ed.) M.N.V. Prasad y Marcel Dekker, Inc. 487 pp.
- National Research Council, (2001). Basic research opportunities in Earth science. National Academia Press, Washington D.C.

- Navarro Hervás, M.C. (2004). Movilidad y biodisponibilidad de metales pesados en el emplazamiento minero Cabezo Rajao (Murcia). Tesis Doctoral, Universidad de Murcia.
- Nedelkoska, T.V. y Doran, P.M. (2000). Characteristics of heavy metal uptake by plant species with potencial for phytoremediation and phytomining. *Minerals Engineering* 13 (5): 549-561.
- Newman, M.C. y Jagoe, C.H. (1994) Inorganic ligands and the bioavailability of metals in aquatic environments. En: A mechanistic understanding of bioavailability: Physical-Chemical interactions. (Eds.) J.L. Hamelink, P.F. Landrum, H.L. Bergman y W.H. Benson. Lewis Publishers, Inc.
- Nordstrom, K., Alpers, C.N., Coston, J.A., Taylor, H.E., McCleskey, R.B., Ball, J.W., Cotsifas, J.S. y Davis, J.A. (1999). Geochemistry, toxicity, and sorption properties of contaminated sediments and pore waters from two reservoirs receiving acid mine drainage. En: Proceedings of the Technical Meeting. Charleston, South Carolina, pp: 289-296.
- Ocampo-Duque, W., Sierra, J., Ferré-Huguet, N., Schuhmacher, M. y Domingo, J.L. (2008). Estimating the environmental impact of micro-pollutants in the low Ebro River (Spain): an approach based on screening toxicity with *Vibrio fischeri*. *Chemosphere* 72: 715-721.
- OECD, (1984). Guideline of the OECD for testing chemical products-terrestrial plants. Growth Test Method 208, Paris.
- Oen, I.S., Fernández, J.C. y Manteca, J.I. (1975). The lead-zinc and associated ores of La Unión, Sierra de Cartagena, Spain. *Economic Geology* 70: 1259-1278.
- Oleszczuk, P. (2007). The toxicity of composts from sewage sludges evaluated by the direct contact tests phytotoxkit and ostracodtoxkit. *Waste management* 28: 1645-1653.
- Onorati, F. y Mecozzi, M. (2004). Effects of two diluents in the Microtox® toxicity bioassay with marine sediments. *Chemosphere* 54: 679-687.

- Orejas, A. y Antolinos, J.A. (2001). Les mines de la Sierra de Cartagena. *Atlas historique des zones minières d'Europe*. Bruselas, Dossier II: 1-14.
- Ostracodtoxkit FTM, (2001). Chronic direct contact toxicity test for freshwater sediments. Standard Operational Procedure, Creasel, Deinze, Belgium.
- Ottenhof, C.J.M., Faz Cano, A., Arocena, J.M., Nierop, K.G.J., Verstraten, J.M. y van Mourik, J.M. (2007). Soil organic matter from pioneer species and its implications to phytostabilization of mined sites in the Sierra de Cartagena (Spain). *Chemosphere* 69: 1341-1350.
- Parrish, W. (1962). Advances in X-Ray diffractometry of clay minerals. *Advances in X-Ray Spectrography*. Eindhoven, Centrex Publishing 6:73-97.
- Parvez, S., Venkataraman, C. y Mukherji, S. (2006). A review on advantages of implementing luminescence inhibition test (*Vibrio fischeri*) for acute toxicity prediction of chemicals. *Environmental International* 32 (2): 265-268.
- Peña, D. (2002). Análisis de datos multivariantes. McGrawHill, 539pp.
- Pérez-Sirvent, C., Martínez-Sánchez, M.J., García-Lorenzo, M.L., Molina, J. y Tudela, M.L. (2009). Geochemical background of zinc, cadmium and mercury in anthropically influenced soils located in a semi-arid zone (SE, Spain). *Geoderma* 148: 307-317.
- Pérez-Sirvent, C., García-Lorenzo, M.L., Martínez-Sánchez, M.J., Navarro, M.C., Marimón, J. y Bech, J. (2007). Metal-contaminated soil remediation by using sludges of the marble industry: Toxicological evaluation. *Environmental International* 33: 502-504.
- Pérez Sirvent, C., Martínez Sánchez, M.J. y García Rizo, C. (1999). Lead mobilization in calcareous soils. En: Fate and transport of heavy metals in the Vadose Zone. (Eds.) H.M. Selim e I.K. Iskandar. Lewis Publishers, 328 pp.
- Phytotoxkit, (2004). Seed germination and early growth microbiotest with higher plants. Standard Operation Procedure. Nazareth, Belgium.

- Pierce, J.W., y Siegel, F. (1969). Quantification of clay mineral studies of sediments and sedimentary rocks. *Journal of Sedimentary Research* 43: 189-193.
- Pierzynski, G.M., Sims, J.T. y Vance, G.F. (2000). Soils and environmental quality. CRC Press, 459 pp.
- Plumlee, G.S, Smith, K.S., Montour, M.R., Ficklin, W.H. y Mosier, E.L. (1999). Geologic controls on the composition of natural waters and mine waters draining diverse mineral deposit types. *Reviews in Economic Geology* 6(B): 373-407.
- Porta, J., López-Acevedo, M. y Poch, R.M. (2008). Introducción a la Edafología, uso y protección del suelo. Mundiprensa, 452pp.
- Rajamani, V., Tripathi, J.K. y Malviya, V.P. (2009). Weathering of lower crustal rocks in the Kaveri river catchment, southern India: Implications to sediment geochemistry. *Chemical Geology*, Doi:10.1016/j.chemgeo.2009.05.007.
- Ramis, G. y García, M.C. (2001). Quimiometría. Síntesis, Madrid, 238pp.
- Real Decreto 9/2005, de 14 de enero, por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados.
- Reeder, R.J., Schoonen, M.A.A. y Lanzirotti, A. (2006). Metal speciation and its role in bioaccessibility and bioavailability. En: *Medical mineralogy and geochemistry*. (Ed.) N. Sahai y M.A.A. Schoonen. The mineralogical Society of America, Chantilly, VA pp: 59-113.
- Reichmann, S.M., (2002). The responses of plants to metal toxicity: a review focusing on copper, manganese and zinc. *Australian minerals and energy environmental foundation* nº 14.
- Roddick-Lanzilotta, A.J., McQuillan, A.J. y Craw, D. (2002). Infrared spectroscopic characterisation of arsenate (V) ion adsorption from mine waters, Macraes mine, New Zealand. *Applied Geochemistry* 17: 445-454.

- Rodríguez Gallego, M., Martín Pozas, J.M., y Martín Vivaldi, J.L. (1969). Análisis cuantitativo de filosilicatos de la arcilla por difracción de rayos X. Influencia de las sustituciones isomórficas y cristalinidad. *Anales de la Real Sociedad de Física y Química* 65: 25-29.
- Rose, S. y Elliot, W.C. (2000). The effects of pH regulation upon the release of sulfate from ferric precipitates formed in acid mine drainage. *Applied Geochemistry* 15:27-34.
- Ruby, M.V., Schoof, R., Brattin, W., Goldade, M., Post, G., Harnois, M., Mosby, D.E., Casteel, S.W., Berti, W., Carpenter, M., Edwards, D., Cragin, D., y Chappell, W. (1999). Advances in evaluating the oral bioavailability of inorganics in soil for use in human health risk assessment. *Environmental Science and Technology* 33 (21): 3697-3705.
- Salminen, R. (1992). Scale of Geochemical surveys. En: Regolith exploration geochemistry in Arctic and temperate terrains. Handbook of exploration geochemistry. (Eds.) L.K. Kauranne, R. Salminen, K. Eriksson y G.J.S. Govett. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, pp: 143-164.
- Salminen, R., Batista, M.J., Bidovec, M., Demetriades, A., De Vivo, B., De Vos, W., Duris, M., Gilucis, A., Gregorauskiene, V., Halamic, J., Heitzmann, P., Lima, A., et al. (2005). Geochemical atlas of Europe, Part 1, Background information, methodology and maps. 526pp. Geological Survey of Finland, Espoo (también disponible en <http://www.gtk.fi/publ/foregsatlas/>).
- Salzsauler, K.A., Sidenko, N.V., Sherriff, B.L. (2005). Arsenic mobility in alteration products of sulfide-rich, arsenopyrite-bearing mine wastes, Snow Lake, Manitoba, Canada. *Applied Geochemistry* 20: 2303-2314.
- Sánchez, J., Marino, N., Vaquero, M.C., Ansoren, J. y Legórburu, I. (1998). Metal pollution by old Lead-Zinc mines in Urmea river valley (Basque country, Spain). Soil, biota and sediment. *Water, Air and Soil Pollution* 107: 303-319.
- Sauquillo, A., Rigol, A. y Rauret, G. (2003). Overview of the use of leaching/extraction tests for risk assessment of trace metals in contaminated soils and sediments. *Trends in Analytical Chemistry* 22: 152-159.

- Schowaneck, D., Carr, R., David, H., Douben, P., Hall, J., Kirchmann, H., Patria, L., Sequi, P., Smith, S. y Webb, S. (2004). A risk-based methodology for deriving quality standards for organic contaminants in sewage sludge for use in agriculture-conceptual framework. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 40: 227-251.
- Schrenk, M.O., Edwards, K.J., Goodman, R.M., Hamers, R.J. y Banfield, J.F. (1998). Distribution of *Thiobacillus ferrooxidans* and *Leptospirillum ferrooxidans*: implications for generation of acid mine drainage. *Science* 279: 1519-1522.
- Schuwirth, N., Voegelin, A., Kretzschmar, R. y Hofmann, T. (2007). Vertical distribution and speciation of trace metals in weathering flotation residues of a Zinc/Lead sulfide mine. *Journal of Environmental Quality* 36: 61-69.
- Seoáñez Calvo, M. (1999). Contaminación del suelo: Estudios, tratamiento y gestión. Ediciones Mundi-Prensa, 352 pp.
- Sheoran, A.S. y Sheoran V. (2006). Heavy metal removal mechanism of acid mine drainage in wetlands: A critical review. *Minerals Engineering* 19: 105-116.
- Sherlock, E.J., Lawrence, R.W. y Poulin, L. (1995). On the neutralization of acid rock drainage by carbonate and silicate minerals. *Environmental Geology* 25: 43-54.
- Shi, G. y Cai, Q. (2009). Cadmium tolerance and accumulation in eight potential energy crops. *Biotechnology Advances* 27: 555-561.
- Smedley, P.L. y Kinniburgh, D.G. (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry* 17: 517-568.
- Smith, A.M.L., Hudson-Edwards, K.A., Dubbin, W.E. y Wright, K. (2006). Dissolution of jarosite $[KFe_3(SO_4)_2(OH)_6]$ at pH 2 and 8: Insights from batch experiments and computational modelling. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70:608-621.
- Starkey, H.C., Blackmon, P.D. y Hauff, P.L. (1984). The routine mineralogical analysis of clay-bearing samples. *U. S. Geological Survey Bulletin* 1563, 33 pp.
- Soil Survey Staff, (1999). Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. 2nd edition. United States Department of

- Agriculture-Natural Resources Conservation services. U.S. Gov. Print. Office, Washington DC, 871pp.
- Sposito, G. (2008). The chemistry of soils. 2^a Edition. Oxford University Press, New York, 330pp.
- Stokke, P.R., y Carson, B. (1973). Variation in clay minerals. X-Ray diffraction results with the quantity of sample mounted. *Journal of Sedimentary Petrology* 43: 957-964.
- Stucki, J.W., Bailey, W. y Gan, H. (1995). Redox reactions in phyllosilicates and their effects on metal transport. En: Metal speciation and contamination of soil. (Eds.) H.E. Allen, C.P. Huang, G.W. Bailey y A.R. Bowers. Lewis Publishers and CRC Press, Boca Raton, Florida, 358pp.
- Sun, Y., Zhou, Q. y Diao, C. (2008). Effects of cadmium and arsenic on growth and metal accumulation of Cd-hyperaccumulator *Solanum nigrum*. *Bioresource Technology* 99: 1103-1110.
- Sun, R.L., Zhou, Q.X. y Jin, C.X. (2006). Cadmium accumulation in relation to organic acids in leaves of *Solanum nigrum* L. as a newly found cadmium hyperaccumulator. *Plant and Soil* 285: 125-134.
- Susarla, S., Medina, V.F. y McCutcheon, S.C. (2002). Phytoremediation: An ecological solution to organic chemical contamination. *Ecological Engineering* 18: 647-658.
- Sutherland, R.A. y Tack, F.M.G. (2002). Determination of Al, Cu, Fe, Mn, Pb and Zn in certified reference materials using the optimized BCR sequential extraction procedure. *Analytica Chimica Acta* 454: 249-257.
- Swayze, G.A., Smith, K.S., Clark, R.N., Sutley, S.J., Pearson, R.M., Vance, J.S., Hageman, P.L., Briggs, P.H., Meier, A.L., Singleton, M.J. y Roth, S. (2000). Using imaging spectroscopy to map acidic mine waste. *Environmental Science and Technology* 34: 47-54.
- Tessier, A., Campbell, P.G.C. y Bisson, M. (1979). Secuential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry* 51: 844-851.

- Torri, D. y Borselli, L. (2000). Water Erosion. En: Handbook of soil science. (Ed.) M.E. Sumner, CRC Press, Washington DC, 2313pp.
- Ure, A.M. y Davison, C.M. (2002). Chemical speciation in soils and related materials by selective chemical extraction. En: Chemical speciation in the environment. (Eds.) A.M. Ure y C.M. Davison. Blackwell Science, 451pp.
- Ure, A.M. (1995). Methods of analysis for heavy metals in soils. En: Heavy metals in soils. (Ed.) B.J. Alloway, Blackie Academic and Professional Publishers, New York, 368pp.
- Valente, T.M. y Leal Gomes, C. (2009). Occurrence, properties and pollution potential of environmental minerals in acid mine drainage. *Science of the Total Environment* 407: 1135-1152.
- Verma, P., George, K.V., Singh, S.K., Juwarkar, A. Y Singh R.N. (2006). Modeling rhizofiltration: heavy metal uptake by plant roots. *Environmental Modeling and Assessment* 11: 387-394.
- Vidal, J. (2002). Evaluación de los principales procesos de degradación en Fluvisoles calcáricos de la Huerta de Murcia. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia.
- Vilar, J.B., Egea Bruno, P.M. y Fernández Gutiérrez, J.C. (1991). La minería murciana contemporánea (1930-1985). IGME, Madrid, 253pp.
- Volke-Sepúlveda, T., Velasco-Trejo, J.A. y De la Rosa-Pérez, D.A. (2005). Suelos contaminados por metales y metaloides: Muestreo y alternativas para su remediación. Instituto Nacional de Ecología. 141pp.
- Volpi Ghirardini, A., Girardini, M., Marchetto, D. y Pantani, C. (2009). Microtox® solid phase test: Effect of diluent used in toxicity test. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 72: 851-861.
- Wilke, B.M., Riepert, F., Koch, C. y Kühne, T. (2007). Ecotoxicological characterization of hazardous wastes. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 70: 283-293.

- Williams, M. (2001). Arsenic in mine waters: an international study. *Environmental Geology* 40: 267-278.
- Wójcik, M., Vangronsveld, J. y Tukiendorf, A. (2005). Cadmium tolerance in *Thlaspi caerulescens* I. Growth parameters, metal accumulation and phytochelatin synthesis in response to cadmium. *Environmental and Experimental Botany* 53: 151-161.
- Xu, T., White, S.P., Pruess K., Hutt, L. y Zealand N. (2008). Pyrite oxidation in saturated and unsaturated porous media flow: A comparison of alternative mathematical modeling approaches. Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, 41pp.
- Yoon, J., Cao, X., Zhou, Q. y Ma, L.Q. (2006). Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. *Science of the Total Environment* 368: 456-464.
- Younger, P.L., Banwart, S.A. y Hedin, R.S. (2002). Mine water: Hydrology, pollution, remediation. Kluwer Academia Publishers, Dordrecht, 464pp.



MENCIÓN
"DOCTORADO EUROPEO"



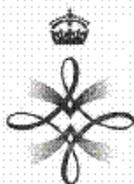
the
UNIVERSITY
of
GREENWICH

Maria De La Luz Garcia Lorenzo

The above student has been working in our laboratories here at the School of Science at the University of Greenwich since October 2nd 2006. She will be departing on 15th December 2006.

During this time she has been working on a research project looking at the effects of additives on the rate of carbonation and the use of a calorimeter to measure the exotherm from carbonation reactions.

Dr Paula Carey
Director, Centre for Contaminated Land Remediation



THE QUEEN'S
ANNIVERSARY PRIZES
For Higher and Further Education
2002

the University of Greenwich at Medway
Central Avenue
Chatham Maritime
Kent
ME4 4TB
Switchboard: +44 (0)20-8331 8000



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BARI

DIPARTIMENTO DI BIOLOGIA E CHIMICA
AGRO-FORESTALE ED AMBIENTALE - DIBCA

IL DIRETTORE

Prof. *NICOLA SENESI*

INFORMA:

Que **Mari Luz García Lorenzo**, becaria predoctoral de la Fundación Séneca, ha realizado una estancia investigadora bajo mi supervisión desde el día 13 de enero de 2009 hasta el 17 de febrero de 2009.

Durante esta estancia se ha llevado a cabo un análisis de elementos traza en muestras vegetales y muestras de suelo, de gran aplicabilidad para el objetivo de la Tesis Doctoral de la estudiante, así como se han puesto en práctica nuevos métodos y técnicas analíticas.

Para que así conste donde proceda y a los efectos oportunos, firmo la presente, en Bari, a 16 de febrero de 2009.

Professor Nicola Senesi



Bari, 16.07.2009

Review of the Thesis:

**EVALUACION DE LA CONTAMINACIÓN POR VÍA HIDRICA DE ELEMENTOS
TRAZA EN ÁREAS CON INFLUENCIA DE ACTIVIDADES MINERO-
METALÚRGICAS.
APLICACIÓN A LA SIERRA MINERA DE CARTAGENA-LA UNIÓN**

The thesis of Mari Luz García Lorenzo deals with pollution phenomena associated to a mine site in Murcia, Spain. The topic is of great interest both for the scientific as well as for the social and administrative point of view.

The work concerns with chemical, physical and biological processes related to the diffusion and sedimentation of trace metals in the environment, the chemical and mineralogical characterization of the wastes, the erosion and hydrological phenomena involved and the description of primary, secondary and tertiary contamination at various distances from the pollution sources.

The objectives of the research concerned also the availability issues related to the trace metals and their impact on living organisms in the environment and on human beings.

I believe the thesis is very well structured defining clear introduction and objectives, describing the methods and the approaches used to obtain different results and presented clear and punctual conclusions. The literature review is rather abundant and the thesis is a very large piece of work complete of tables, figures and consequent deductions.

Further, I believe that the work is very interesting and useful and its methodological model seems to be potentially transferable to various contaminated sites either in Spain or foreign countries.

I sincerely believe the thesis is in line with the European requirements and that can surely be submitted for the European Doctorate degree final discussion.

Sincerely,



Teodoro Miano
Professor, Soil Chemistry





EUROPEAN COMMISSION
JOINT RESEARCH CENTRE

Institute for Environment and Sustainability

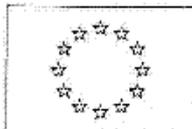
Subject: Informe tesis doctoral "EVALUACION DE LA CONTAMINACIÓN POR VÍA HIDRICA DE ELEMENTOS TRAZA EN ÁREAS CON INFLUENCIA DE ACTIVIDADES MINERO-METALÚRGICAS. APLICACIÓN A LA SIERRA MINERA DE CARTAGENA-LA UNIÓN". Autora: Mari Luz García Lorenzo.

La tesis bajo evaluación realiza una exhaustiva caracterización geoquímica y de dispersión de contaminantes en la zona evaluada, mediante una metodología de muestreo que permite la identificación de focos de contaminación, vías de transferencia y zonas de recepción; determinando las características químicas y cuantificando contaminantes traza en suelos de ramblas, en eventuales depósitos o balsas de flotación, en aguas de escorrentía, en aguas de poro, en sedimentos y en vegetación autóctona.

En este trabajo, se lleva a cabo un detallado estudio de la movilidad natural y potencial de los elementos traza, teniendo en cuenta las características del suelo, origen y deposición de los mismos, así como las condiciones ambientales; identificándose riesgos y factores que afectan a dicha movilidad. Se efectúa, por otro lado, una evaluación toxicológica a lo largo de la cadena trófica: asociando toxicidad con elementos trazas específicos e identificando factores ambientales que pueden atenuar la toxicidad de los mismos y su dilución durante el transporte desde las fuentes de origen. Se estudia la tolerancia de la vegetación autóctona a los elementos traza, identificándose algunas especies como hiperacumuladores de hierro y cadmio. Por último, se evalúa la posible movilización de elementos traza en el tracto gastrointestinal, en función de su biodisponibilidad ante condiciones simuladas de extracción.

La tesis conlleva un importante volumen de trabajo experimental (desde la toma de muestras hasta su preparación para el análisis), utilizando numerosas técnicas analíticas que requieren un alto nivel de especialización, destacándose: la difracción de rayos X, cromatografía iónica, espectrometría de absorción atómica, ICP-MS, GH-AFS, al igual que ensayos de biotoxicidad (MICROTOX[®], phytotoxkit[®], Ostracodtoxkit[®]).

La zona de estudio presenta un gran interés desde el punto de vista de análisis de riesgo, por la decisiva influencia antropogénica en la dispersión de contaminantes traza, debido a la histórica actividad minera, su orografía y condiciones climáticas, así como, por el interés turístico y densidad de población que caracteriza la zona de Cartagena, La Unión y el Mar Menor.



EUROPEAN COMMISSION

JOINT RESEARCH CENTRE

Institute for Environment and Sustainability

La memoria está redactada de un modo correcto y estructurado, siendo los objetivos claramente identificados. La metodología y el rigor científico se hacen patentes en los distintos planteamientos y estudios llevados a cabo en la misma. Las conclusiones son consecuentes con las evidencias científicas previamente expuestas. A su vez, el trabajo está adecuadamente referenciado y avalado por numerosas publicaciones científicas llevadas a cabo dentro del grupo de investigación.

Finalmente, el estudio, puede considerarse como referente metodológico para futuras evaluaciones de riesgo de dispersión de contaminantes en terrenos contaminados por actividades antropogénicas o mineras y recuperación de los mismos.

Por todo lo anteriormente expuesto emito sin ningún tipo de duda este informe favorable para que la autora de la tesis opte al correspondiente grado de doctor en su modalidad europea.

Ispra, 15 de julio de 2009

Dr. Pascual Pérez Ballesta

Scientific Officer

Institute for Environment and Sustainability

Joint Research Centre – European Commission.



14. OVERVIEW

14.1. Introduction.

Trace element pollution is an important environmental problem. Mining activities, among others, are characterised by high waste generation, high concentrations of trace elements and usually low pH values, a combination which often results in severe contamination problems. Both past and present-day mining activities may represent a current source of pollution, since trace elements are introduced into the atmospheric, terrestrial and aquatic ecosystems.

Elevated levels of trace elements can be found in and around disused metalliferous mines, due to discharge and dispersion of mine wastes into nearby agricultural soils, food crops and stream systems.

Trace elements contained in the residues from mining and metallurgical operations are often dispersed by wind and/or water after their disposal. These areas have severe erosion problems caused by wind and water run-off in which soil and mine spoil texture, landscape topography and regional and microclimate play an important role.

Water pollution by dissolved metals in mining areas has mainly been associated with the oxidation of sulfide-bearing minerals exposed to weathering conditions, resulting in low quality effluents of acidic pH and containing a high level of dissolved metals.

The extent and degree of heavy metal contamination around mines vary depending upon geochemical characteristics and degree of mineralization of the tailings. The metals released by sulfide oxidation are attenuated by precipitation, coprecipitation and sorption reactions in and around the mines.

Bioavailability, rather than total content, is increasingly used as a key indicator of the potential risk that contaminants pose to the environment and human health. Determination of the contaminant content is not enough to evaluate the toxic effects or to characterise contaminated sites, because such a measure does not reflect the ecotoxicological danger in the environment and does not provide information on the effects of the chemical compounds.

Ecotoxicity tests measure the bioavailability of the contaminants and the effects of the chemically not measured toxic compounds on the members of the soil community. Therefore, ecotoxicological testing may be a useful approach for

assessing the toxicity as a complement to chemical analysis. Any strategy for assessing properties potentially hazardous to the environment used in a classification system should include test organisms of different trophic levels representing both the terrestrial and aquatic compartments.

Bacteria play a vital role as decomposers in aquatic systems and hence there is justification for their inclusion in a test battery for assessing sediment toxicity. *Vibrio fischeri* was chosen to assess the acute toxicity of sediment pore-water and water samples. Plants are particularly important components in ecosystems since they are the primary food producers and so it is important to identify the magnitude of the toxicity results in these organisms. Finally, the crustacean bioassay with *Heterocypris incongruens* was selected as a representative test of an herbivorous invertebrate species for screening sediment samples.

Phytoremediation is considered as a potential solution for the remediation of contaminated soils. The success of phytoremediation technology is dependent on several factors such as the ability of the selected plant species for accumulating high concentrations of metal in the shoots and to produce high biomass. Some plant species can be grouped according to their trace element accumulation capability. For example, excluders have an avoidance (or restriction) mechanism which prevents element uptake, while accumulators have mechanisms of metal tolerance and accumulation in their aboveground biomass. A sub-group within the accumulators is represented by hyperaccumulators, which are plants commonly growing on metalliferous soils and able to complete their life cycle without any sign of metal phytotoxicity.

Finally, heavy metal bioavailability in mine waste and soils could be determined by sequential extractions, with two distinct extraction steps: a gastric-phase extraction, that simulates the acidic biochemical stomach environment and a subsequent intestinal-phase extraction that simulates the biochemical environment of the small intestine. The fraction of the contaminant which is dissolved by the *in vitro* procedure has been used to estimate the relative bioavailability of the contaminant in soil.

14.2. Study area.

The studied area, Sierra Minera, is close to the mining region of La Unión (Murcia, SE Spain). The entire area is located between Cabo de Palos and Cartagena and was for many centuries subjected to mining. The annual average temperature is 17 °C and precipitation does not exceed 300 mm, with occasional torrential rainfall, which frequently occurs in the period between the end of summer and autumn. Wind is an almost constant atmospheric phenomenon in the littoral zone.

14.3. Material and methods.

14.3.1. Material and sampling method.

From contamination sources, present in mining areas, a dispersion of polluting agents, as a consequence of torrential rains, takes place.

In our area, dispersion routes of these polluting agents are the gullies. Deposition occurs in topographically lower areas where materials are mixed with the surrounding materials, with a carbonated nature. The sampling design has been made to compare gradient of concentration, possible metal mobilization and organism toxicity. The sampling points have been selected according to their proximity to the contamination source, establishing three types of samples: samples located in areas next to the contamination source (primary contamination), samples located in the dispersion routes (secondary contamination) and samples located in areas minimally affected by the contaminants.

Water samples were collected at the same site as the sediment after a rain episode.

14.3.2. Sample preparation and chemical analysis.

Sediment samples were collected at 0–15 cm depth, air-dried and sieved through a 2 mm screen for general analytical determinations. The pH was determined in a 1:5 (v/v) suspension of sediment in Milli-Q quality water and in a 1M KCl solution using a Crison GLP21 pH meter. Electrical conductivity (EC) (dS m⁻¹ at 25°C) was measured using a Crison GLP31 meter in the extracts obtained by filtering the 1:5 suspensions through a 0.45 µm cellulose acetate disk filter. Equivalent calcium carbonate (%) was determined by the volumetric method using a Bernard calcimeter previously calibrated against Na₂CO₃. The organic matter content was measured by wet oxidation method.

A semiquantitative estimation of the mineralogical composition of the samples was made by X Ray Diffraction (XRD) analysis using Cu-Kα radiation with a PW3040 Philips Diffractometer. X-powder software was used to analyse the X-ray diffraction diagrams obtained by the crystalline powder method. The powder diffraction file (PDF2) database was used for peak identification, taking into account that the determination of minerals from soils by XRD analysis is not accurate below a limit of 5% of the total weight in a sample (depending on the crystallinity of individual minerals).

To determine trace element content, sediments were first ground to a fine powder using an agate ball mill. 0,1 g of sediment samples was placed in Teflon vessels and 5 ml of concentrated HF acid solution, 200 µl of concentrated HNO₃ acid solution and 5 ml of water were added. When digestion was complete (15 minutes at 1000W in a Milestone ETHOS PLUS microwave), the samples were transferred to a volumetric flask and brought to 50 ml. The Zn and Fe content was determined by flame atomic absorption spectrometry (FAAS) using a Perkin-Elmer 1100B Atomic Absorption Spectrophotometer. The Pb, Cd and Cu content was determined by electrothermal atomization atomic absorption spectrometry (ETAAS) using an Unicam 929 AAS spectrometer. The As content was analysed by atomic fluorescence spectrometry using an automated continuous flow hydride generation (As-AFS) spectrometer (PSA Millenium Merlin 10055 for As). The reliability of the results was verified by analysing a standard reference material (SRM 2711 Montana Soil).

After sampling, water samples were filtered and stored for posterior analysis. Finally, pore-water samples were obtained. To extract the pore-water, the soil was subjected to a vacuum pressure (negative pressure) to extract the soil solution through filter paper.

14.3.3. Toxicity tests.

14.3.3.1. Microtox Bioassay®.

The Microtox® bioassay is based on the inhibition of the bioluminescent marine bacteria *Vibrio fischeri* and was applied to the water and pore-water samples according to the protocol. The bioluminescence emitted by the bacteria is reduced in the presence of polluting agents and this reduction is directly related to the toxicity of the sample. Toxicity is expressed as the agent concentration which produces a 50% reduction of the initial luminescence (EC_{50}) after 15 minutes of contact time. Bioluminescent responses were measured using a Microtox Model 500 analyser. A basic test was conducted with the reference standard for each fresh vial of bacteria opened to ensure the validity of the test method.

14.3.3.2. Phytotoxkit® and Ostracodtoxkit® method.

The Phytotoxkit® test measures the decrease in (or the absence of) seed germination and of the growth of the young roots after 3 days of exposure of seeds of selected higher plants to a contaminated matrix compared with the controls germinated in a reference soil. It is recommended that at least one monocotyledon and one dicotyledon species should be used in these tests. The plants selected for the Phytotoxkit® were: the monocotyl *Sorghum saccharatum* (Sorgho) and the dicotyls *Lepidium sativum* (Garden cress) and *Sinapis alba* (mustard).

Finally, toxicity determination of the sediment samples was performed in a short term contact test using an Ostracodtoxkit® test.

14.3.4. Plant uptake.

For this study, five plant species were taken from the surrounding area of Sierra Minera, close to the mining region of La Unión.

In order to evaluate the phytoextraction potential of the selected plants, the transfer factor was calculated after to determine trace element concentrations in roots and shoots of these plants.

The term transfer factor (TF) has been defined as the ratio of metal concentration in plants to the total metal concentration in soil.

14.3.5. Human bioavailability.

To assess bioavailability, the gastric solution was prepared according to the standard operating procedure (SOP) developed by the Solubility/Bioavailability Research Consortium (SBRC)

14.3.6. GIS methodology.

The sampling points, precisely defined by GPS, were integrated to create a database in which the coordinates and the value of the analytical characteristics for each point were included.

With the orthophotos and the Digital Terrain Model (DTM), hydrography restitution was carried out to study possible relationship between toxicity values and hydrographic net.

14.4. Results and discussion.

14.4.1. Chemical analysis.

Materials could be classified as a function of its chemical and mineralogical composition as:

- Primary contamination:
 - Particulated: These materials are the most reactive, with acidic pH values and fine texture. Their mineralogical composition is characterised by jarosites, alunite, gypsum and other sulphates, such as goldichite and hexahydrite. Generally, these sediments show acidic pH but sampling points located in areas influenced by sea water, superficial sediment pH value is basic. In addition, trace element concentration is high (Tables 14.1, 14.2 and 14.3).

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	EC (1:5) (dS/m)	% CaCO ₃	%O.M.
Average	4,8	4,5	323,9	4,9	3,7	<ld
Maximum	8,5	8,5	570	15,8	6,1	<ld
Minimum	2,1	1,8	114	0,6	1,3	<ld

Table 14.1. Analytical characteristics in primary contamination samples

	Filo14	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Gp	Jar	Hem	Hex	Gt	Aka	Alu	Gol	Am	Dol	ZnSO ₄	Mag	Sd
Av.	4	8	6	6	22	12	17	5	0,2	5	6	1	7	4	0,3	0,3	0,3	1
Max	14	16	12	13	38	26	39	13	4	13	24	5	14	11	10	5	5	22
Min.	-	4	2	-	3	6	5	1	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-

Table 14.2. Mineralogical composition in primary contamination samples

	Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
Average	11337	8879	43	190456	1756	477	3568	588
Maximum	30405	47619	90	361251	4429	1335	20182	1967
Minimum	1722	2039	21	45744	407	135	495	1

Table 14.3. Trace element content in primary contamination samples

- Dissolved: Waters showed acidic pH, high trace element content and soluble salts, sulphates such as bianchite, coquimbite, halotrichite and siderotil, and chlorides such as halite, polihalite and carnalite (Table 14.4).

	pH	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Hg	Cu	Mn	Al
		mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Average	4,0	2633	2	11	1501	1883	<ld	8	524	449
Maximum	8,3	20000	4,9	66,0	26150	15881	<ld	76	3110	7300
Minimum	1,7	0,4	0,0	0,1	0,1	0,2	<ld	0,0	0,7	0,2

Table 14.4. Trace element content in water

- Secondary contamination:
 - Particulated: sediments have been mixed with parent material, being some trace elements retained. Even if a natural attenuation process takes place, trace element concentration is high. Their mineralogical composition mainly consists in jarosite, alunite and other sulphates, such as gypsum and goldichite. Phyllosilicates, feldspars and quartz content is higher than in primary contamination sediments. In addition, pH values are also higher (Tables 14.5, 14.6 and 14.7).

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	EC (1:5) (dS/m)	% CaCO ₃	%O.M.
Average	6,9	6,6	187,4	2,0	11,0	1,0
Maximum	8,2	8,1	282	4,5	25	1,6
Minimum	2,5	2,4	108	0,2	1	0,3

Table 14.5. Analytical characteristics in secondary contamination samples

	Filo14	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Gp	Jar	Hem	Cal	Dol	Gol	Am	Gt	Aka	Alu	Gol	Mag	Sid
Av.	5	11	8	5	30	7	5	5	7	3	3	2	3	10	1	1	0,5	29
Max.	14	25	11	13	44	32	14	9	24	13	7	3	8	14	7	7	4	40
Min.	-	2	1	-	9	-	-	2	-	-	-	-	-	1	-	-	-	18

Table 14.6. Mineralogical composition in secondary contamination samples

	Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
Average	7266	2475	31	114958	1117	272	6556	695
Maximum	14216	4612	45	183112	3115	658	23901	1590
Minimum	1210	554	10	42304	107	30	1447	13

Table 14.7. Trace element content in secondary contamination samples

- Dissolved: superficial waters showed lower concentration of trace elements and higher pH values. The most common soluble minerals are hexahydrate, gypsum and halite (Table 14.8).

	pH	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Hg	Cu	Mn	Al
		mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Average	7,3	36	0,9	0,9	0,1	2,4	<ld	0,0	12	0,7
Maximum	8,5	180	0,9	2,6	0,2	3,7	<ld	0,0	15	2,4
Minimum	4,8	0,1	0,9	0,0	0,0	1,1	<ld	0,0	1	0,2

Table 14.8. Trace element content in water samples

- Tertiary contamination:
 - Particulated: tailing influence is less representative, because materials have been mixed with carbonates, taking place an attenuation process. Mineralogical composition of these sediments is characterised by calcite and dolomite and then, their pH values are basic. Moreover, jarosite and alunite are less important (Tables 14.9, 14.10 and 14.11).

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	EC (1:5) (dS/m)	% CaCO ₃	% O.M.
Average	8,0	7,6	217,1	1,5	17,2	1,2
Maximum	9,1	9	300	6,2	68,5	1,7
Minimum	6,4	6,2	169	0,2	1,3	0,7

Table 14.9. Analytical characteristics in tertiary contamination samples

	Filo14	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Gp	Jar	Hem	Cal	Dol	Gol	Am	Alu	Gol	Aka
Av.	14	13	8	7	27	3	5	4	8	5	2	3	3	3	11
Max.	22	21	17	44	47	17	18	7	14	10	7	7	23	14	13
Min	6	3	5	2	0	0	0	0	3	2	0	1	0	0	9

Table 14.10. Mineralogical composition in tertiary contamination samples

	Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
Average	6485	1192	23	135017	972	325	7448	469
Maximum	23430	4688	46	189962	2600	674	23901	1590
Minimum	3049	2016	14	42304	107	30	1528	13

Table 14.11. Trace element content in tertiary contamination samples

- Dissolved: soluble carbonated are present in waters affected by tertiary contamination and aids to trace element precipitation as carbonates. Precipitation also occurs as hydroxides. Trace element concentration is low and pH is neutral or basic. The stabilization of trace elements with carbonates agrees with the low contents of soluble metals in the surface waters collected in this zone (Table 14.12).

	pH	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Hg	Cu	Mn	Al
		mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Average	7,1	19	0,9	0,4	0,9	3,3	<ld	0,1	4,5	0,2
Maximum	7,4	30	1,2	0,8	1,6	3,3	<ld	0,1	11,5	0,2
Minimum	6,6	12	0,6	0,0	0,0	3,3	<ld	0,1	0,9	0,2

Table 14.12. Trace element content in water samples

- Different origin:
 - Particulated: generally are red soils (luvic Xerosols and calcic Luvisols). Trace element content is due to geogenic values. Their mineralogical composition is characterised by iron and aluminium oxides, quartz, phyllosilicates and feldspars (Tables 14.13, 14.14 and 14.15).

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	EC (1:5)	% CaCO ₃	%O.M.
				(dS/m)		
Average	8,2	7,8	171,1	1,0	26,2	1,7
Maximum	8,5	8	228	2,5	43	1,9
Minimum	7,5	7	138	0,1	1,2	1,5

Table 14.13. Analytical characteristics in different origin samples

	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Cal	Dol	Hem	Ara	Am
Av.	11	3	10	24	18	18	16	41	6
Max.	23	5	15	40	31	89	25	42	9
Min.	3	2	2	3	2	7	2	41	3

Table 14.14. Mineralogical composition in different origin samples

	Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
Average	1857	250	23	53447	171	66	2311	2748
Maximum	3247	538	34	161116	327	171	4327	5021
Minimum	135	25	6	1419	22	13	864	114

Table 14.15. Trace element content in different origin samples

- o Dissolved: rainfall waters collected in these points show low trace element content (Table 14.16).

	pH	Zn	Pb	Cd	Fe	As	Hg	Cu	Mn	Al
		mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Average	7,4	6,9	0,7	0,9	0,9	1,3	<ld	0,1	0,9	0,2
Maximum	7,8	15,0	0,8	3,0	1,6	1,3	<ld	0,1	1,2	0,3
Minimum	6,6	0,1	0,6	0,0	0,1	1,3	<ld	0,1	0,5	0,2

Table 14.16. Trace element content in water samples

14.4.2. Toxicity test.

According to bioassays results, is advisable to complement chemical analyses with environmental toxicity testing to characterise bioavailability presented by contaminated sediments.

Knowing trace element concentration in contaminations sources, we can deduce that the application of one bioassay does not discriminate all the contamination sources. However, the application of a test battery allows the identification of contamination sources and non contaminated areas, corresponding to decreasing toxicity values.

14.4.3. Plant uptake.

The metal concentrations in plants varied with plant species. Plant accumulation results in selected species showed that *Dittrichia viscosa* is a hyperaccumulator for Cd, while *Zygophyllum fabago* could hyperaccumulate iron and *Arthrocnemum macrostachyum* iron, arsenic and manganese.

The other plant species collected from the mining sites were tolerant but not hyperaccumulators because their TF values were lower than 1. Although these plant species do not accumulate high concentrations of metals, they may be a good tool for reducing erosion effects and also for reducing the leaching of metals.

14.4.4. Human bioavailability.

Trace element gastric-phase bioavailability was higher than intestinal-phase bioavailability, except for the cinc. Zn mobility was higher than Cd, Pb, Cu and As. The highest concentrations were found in sediments affected by primary contamination (Table 14.17).

	Pb A	Pb N	Zn A	Zn N	Fe A	Fe N	Cd A	Cd N	As A	As N
Primary cont	6	1,6	15,7	17,2	0,05	0,02	6,3	4,2	0,25	0,15
Atten. Phyllites	0,6	0,6	6,8	9,9	0,01	0,03	1,3	10,3	0,04	0,07
Grain-selection	0,9	0,5	1,5	1,6	0,01	0,01	0,4	0,2	0,02	0,02
Carbonates	5,1	0,8	3,3	8,9	0,12	0,08	3,2	2,3	0,58	0,43
Without mining influence	26,6	75,6	-	-	0,01	0,02	8,7	15,2	0,45	0,8

Table 14.17. Biavailable fraction.

A: gastric-phase; N: intestinal-phase.



15. CONCLUSIONS

1. In the study area, which is strongly affected by mining activities, we have studied:

- Contamination sources, being the most important:
 - Tailing dumps, located in topographically elevated areas of Sierra Minera district.
 - Tailing dumps, produced by wastes from mining operations, which were discharged directly into the sea and affected by the circulating currents or which were discharged close to sea.

- Superficial hydric dispersion ways:
 - Mostly gullies.
 - Transport through hillsides.

Superficial materials suffer supergene alteration, releasing a great amount of trace elements and sulphates, which are transported by torrential rainfall, an usual phenomenon in the studied area, as dissolved and particulate forms.

The further trace element transport takes place in dissolved form, since after rain episodes, particulated materials are deposited the first.

If contamination sources are located close to the sea, transport processes are very important.

Dissolved and particulated flows in the studied area are:

- Trace element flow from tailings located in the Sierra Minera and contaminations sources placed close to the sea.
- Trace element flow from surrounding soils.
- Carbonate flow, which attenuates trace element contamination.
- Particle flow, from surrounding soils.
- Sea water flow, providing sodium and chlorides.

- Reception areas of these materials are:
 - Gully watercourses.
 - Soils located close to tailings, collecting contaminated materials by run-off processes.
 - Soils and sediments placed in the gully alluvial fan.
 - Mediterranean Sea and Menor Sea.

Places where materials are deposited could act later as contamination sources.

- In the studied area contamination attenuation processes occur, due to:
 - Mixing with carbonates, dissolved or particulated.
 - Mixing with phyllites or parent rock.
 - Grain-selection by sea currents, if wastes were discharged into the sea.

2. Superficial materials are suffering weathering processes, generating products resulting from the supergene alteration, such as iron and manganese oxides and hydroxides, carbonates, hydrated sulphates and jarosites. Oxidation-reduction processes, together with dissolution, hydration, evaporation and neutralization are the most important processes in mobilization and trace element current dispersion.

Trace element mobilization processes by different ways in the mining district of Cartagena-La Unión are still actives. Contamination sources do not present natural vegetation and are placed in areas with high slope, erosion and transport processes being very important.

3. Materials could be classified as a function of its chemical and mineralogical composition as:

- Primary contamination:
 - Particulated: These materials are the most reactive, with acidic pH values and fine texture. Their mineralogical composition is

characterized by jarosites, alunite, gypsum and other sulphates such as goldichite and hexahydrite. Generally, these sediments show acidic pH, although for sampling points located in areas influenced by sea water, superficial sediment pH value is basic. In addition, trace element concentration is high.

- Dissolved: Waters showed acidic pH, high trace element content and soluble salts, sulphates such as bianchite, coquimbite, halotrichite and siderotil, and chlorides such as halite, polihalite and carnalite.
- Secondary contamination:
 - Particulated: sediments have been mixed with parent material, being some trace elements retained. Even if a natural attenuation process takes place, trace element concentration is high. Their mineralogical composition mainly consists in jarosite, alunite and other sulphates, such as gypsum, goldichite and hexahydrite. Phyllosilicates, feldspars and quartz content is higher than in primary contamination sediments. In addition, pH values are also higher.
 - Dissolved: superficial waters showed lower concentration of trace elements and higher pH values. The most common soluble minerals are hexahydrite, gypsum and halite.
- Tertiary contamination:
 - Particulated: tailing influence is less representative, because materials have been mixed with carbonates, taking place an attenuation process. Mineralogical composition of these sediments is characterized by calcite and dolomite and then, their pH values are basic. Moreover, jarosite and alunite are less important.
 - Dissolved: soluble carbonates are present in waters affected by tertiary contamination, result in trace element precipitation as carbonates. Precipitation also occurs as hydroxides. Trace element concentration is low and pH is neutral or basic. The

stabilization of trace elements with carbonates agrees with the low contents of soluble metals in the surface waters collected in this zone.

- Different origin:
 - Particulated: generally are red soils (luvic Xerosols and calcic Luvisols). Trace element content is due to geogenic values. Their mineralogical composition is characterized by iron and aluminium oxides, quartz, phyllosilicates and feldspars.
 - Dissolved: rainfall waters collected in these points show low trace element content.

4. Trace element natural mobilization is produced according to mineralogical composition and sediment pH, and mainly occurs in soluble salts, such as hydrated sulphates. In these conditions the most mobile elements are $Cd > Mn > Zn > Cu$, and less mobile are $Pb > As > Fe$. Trace elements association to carbonates involves a decrease of trace element mobilization, and then an attenuation process.

5. Potential mobilization results suggested that:

- Highest trace element mobilization happens in acid extraction, where hydrated sulphates, gypsum, bad crystallized jarosites and carbonates (siderite is partially affected) are mobilized. The most mobile elements are $Pb > Cd > Zn > Mn$, followed by $Cu > Fe > As$. We can conclude that in this area, sediments affected by primary contamination showed high mobilization in acidic medium, then, these sediments could act later as trace element sources.
- Mobilization in oxidising medium was somewhat lower than in acidic medium, because sediments have not organic matter and sulphides in their mineralogical composition. With this extraction, sulphides, hydrated sulphates, gypsum, bad crystallized jarosites and carbonates

(partially) are mobilised. Trace element mobility in this extraction was similar to nitric extraction.

- Amorphous stuff, hydrated sulphates, gypsum, jarosites and hematite are mobilised in reducing-complexing medium, together with carbonates, partially attacked. Trace element mobility in this medium was: Cd>Fe>Mn>As>Cu>Pb.

6. According to bioassays results, it is highly advisable to complement chemical analyses with environmental toxicity testing to characterise bioavailability presented by contaminated sediments. Knowing trace element concentration in contaminations sources, we can deduce that the application of one bioassay does not discriminate all the contamination sources. However, the application of a test battery allows the identification of contamination sources and non contaminated areas, corresponding to decreasing toxicity values.

7. The metal concentrations in plants varied with plant species. Plant accumulation results in selected species showed that *Dittrichia viscosa* is a hyperaccumulator for Cd, while *Zygophyllum fabago* could hyperaccumulate Fe and *Arthrocnemum macrostachyum* iron, arsenic and manganese. The other plant species collected from the mining sites were tolerant but not hyperaccumulators because their TF values were lower than 1. Although these plant species do not accumulate high concentrations of metals, they may be a good tool for reducing erosion effects and also for reducing the leaching of metals.

8. Trace element gastric-phase bioavailability was higher than intestinal-phase bioavailability, except for the Zn. Zn mobility was higher than Cd, Pb, Cu and As. The highest concentrations were found in sediments affected by primary contamination.

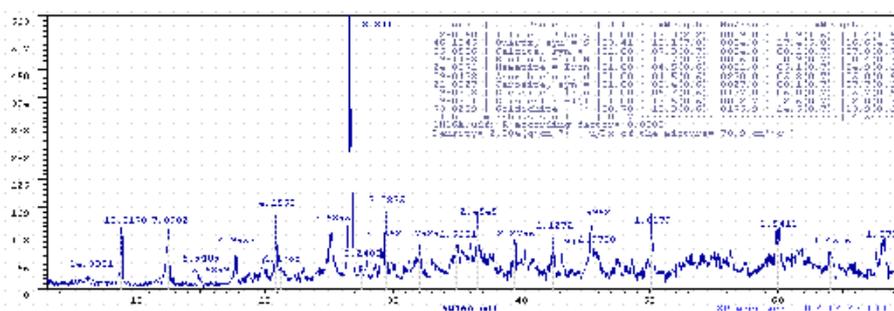


A1 SEDIMENTO

	Descripción macromorfológica	Marrón amarillento oscuro (10YR 3/3) en húmedo y Marrón pálido (10YR 6/3) en seco. Estructura débil en bloques subangulares finos. Adherente; Ligeramente plástico; Firme; Muy duro.
---	-------------------------------------	--

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
A1	7,6	7,4	127	1,5	12,6	<ld

Mineralogía (%)	Filo14	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Jar	Hem	Cal	Gt	Gol	Amorfo
A1	12	11	10	5	17	8	5	8	6	14	4



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
A1	Húmedo	1,2	60,3	22,2	7,8	5,1	1,6	1,6	-
	Seco	6,1	22,9	4,7	-	13,5	13,9	38,6	0,5

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	15438	3118	46	151394	1294	674	14940	245
	MJ	1857	34	10,5	40964	67,5	4,6	373	<ld
	1:5	<ld	4	0,02	1,1	0,07	0,5	2,4	<ld
	Ácida	4756	2805	40,7	6423	3,4	32,5	1860	<ld
Oxidante	366	67	6,9	185	1,9	3,7	305	<ld	

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
A1	0,3	2	15	37	0,1	3	2	4	0,4	0,5	21	12,3

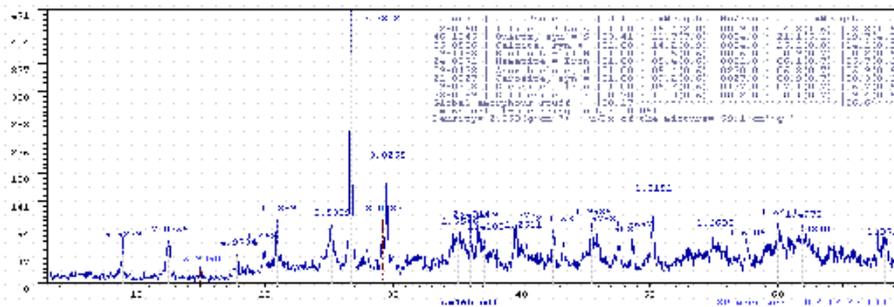
Ecotoxicidad	A1	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	10	24,49
<i>L. sativum</i>	20	8,33
<i>S. alba</i>	0	77,93
<i>H. incongruens</i>	18,33	49,15

A2 SEDIMENTO

	Descripción macromorfológica	Marrón amarillento oscuro (10YR 3/4) en húmedo y Marrón amarillento claro (10YR 6/4) en seco. Estructura débil en bloques subangulares finos. Ligeramente adherente; Ligeramente plástico; Friable; Duro.
		(Empty space for additional description)

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
A2	7,7	7,5	156	1,7	2,7	<ld

Mineralogía (%)	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Jar	Hem	Cal	Gt	Gol	Amorfo
A2	13	10	6	20	8	6	14	7	9	7



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
A2	Húmedo	1,6	61,4	21,0	6,9	5,1	0,09	3,5	0,4
	Seco	1,8	5,6	1,0	2,5	10,3	15,8	62,5	0,6

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	23430	3594	35	111111	1348	306	9662	<ld
	MJ	5598	54	11,6	43683	71,9	14,9	856	<ld
	1:5	4,9	0,1	0,01	0,9	0,07	0,4	11,1	<ld
	Ácida	11429	2667	10,5	4952	3	36,2	1726	<ld
Oxidante	1190	62	16,2	200	1,5	5,7	619	<ld	

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
A2	0,6	2	14	36	0,1	3	2	4	0,4	0,4	21	14,1

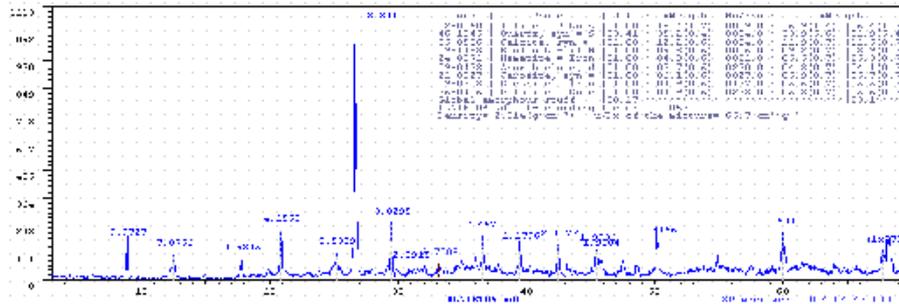
Ecotoxicidad	A2	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	10	21,23
<i>L. sativum</i>	0	6,73
<i>S. alba</i>	10	74,75
<i>H. incongruens</i>	30	49,70

A3 SEDIMENTO

	<p>Descripción macromorfológica</p> <p>Marrón amarillento oscuro (10YR 4/4) en húmedo y Marrón pálido (10YR 6/3) en seco, Estructura moderada en bloques subangulares medianos. Adherente; Plástico; Firme; Muy duro.</p>
---	--

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
A3	7,8	7,7	105	1,2	4,3	1,3

Mineralogía (%)	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Jar	Hem	Cal	Dol	Gt	Amorfo
A3	16	9	4	33	6	5	13	6	5	3



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
A3	Húmedo	1,4	11,0	7,3	6,9	22,5	24,3	18,3	8,2
	Seco	3,7	14,7	7,7	0,8	25,7	14,8	32,6	0,2

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	5599	2274	20	110516	678	350	2434	<ld
	MJ	2317	93	7,4	38094	72,7	3,8	947	<ld
	1:5	<ld	0,04	0,003	1,2	0,003	0,07	<ld	<ld
	Ácida	2206	2206	12,3	3358	3,5	28,9	1618	<ld
Oxidante	588	74	9,3	111	2,2	4,4	441	<ld	

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
A3	0,6	2	14	36	0,1	3	2	4	0,4	0,4	21	9,8

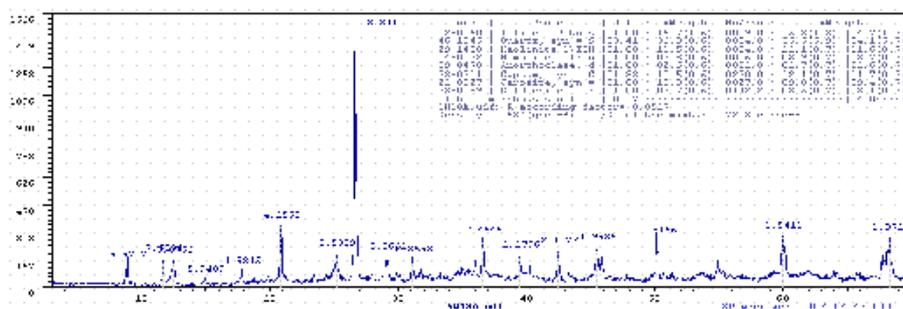
Ecotoxicidad	A3	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	20	64,76
<i>L. sativum</i>	0	0
<i>S. alba</i>	10	0
<i>H. incongruens</i>	3,3	19,35

A4 SEDIMENTO

	Descripción macromorfológica	Marrón (10YR 4/3) en húmedo y Marrón amarillento (10YR 5/4) en seco. Estructura moderada en bloques subangulares. Adherente; Plástico; Firme; Duro.
---	-------------------------------------	---

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
A4	8,0	7,9	191	11,7	<ld	<ld

Mineralogía (%)	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Gp	Jar	Hem	Gol	Amorfo
A4	15	12	6	29	13	10	4	8	5



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
A4	Húmedo	0,09	11,7	13,3	16,6	24,0	15,7	13,0	5,5
	Seco	5,6	21,9	12,6	16,7	1,1	18,1	22,7	1,5

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	24177	3405	24	103440	943	599	3240	1558
	MJ	4341	45	10	37841	50,5	14,3	1136	<ld
	1:5	3,1	1,2	1	1	0,004	0,005	1,8	<ld
	Ácida	14717	1267	23,4	4922	2,9	37,5	1011	<ld
	Oxidante	1949	231	18	77	2,8	6,8	804	<ld

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
A4	2	3	12	35	0	8	1	4	0	0	15	13,8

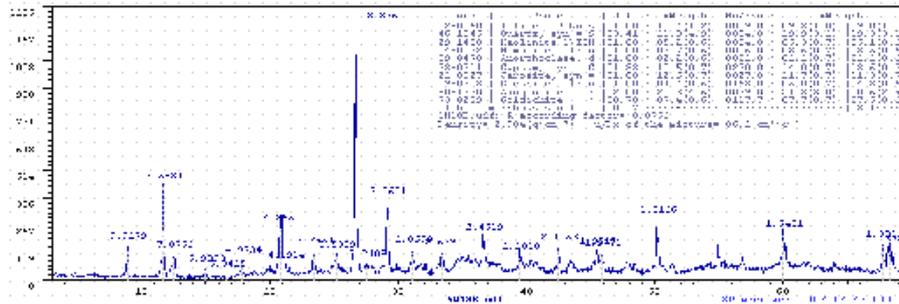
Ecotoxicidad	A4	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	100	
<i>L. sativum</i>	100	
<i>S. alba</i>	100	
<i>H. incongruens</i>	100	

A5 SEDIMENTO

	<p>Descripción macromorfológica</p> <p>Marrón oscuro (10YR 3/3) en húmedo y Marrón amarillento (10YR 5/4) en seco. Estructura moderada en bloques subangulares. Ligeramente adherente; Ligeramente plástico; Firme; Ligeramente duro.</p>
---	--

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
A5	8,5	8,5	250	11,7	1,3	<ld

Mineralogía (%)	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Gp	Jar	Hem	Gt	Aka	Gol	Amor
A5	9	5	3	30	15	12	4	5	7	8	3



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
A5	Húmedo	0,1	12,0	12,0	15,7	23,9	17,3	14,0	4,9
	Seco	3,2	14,4	9,6	5,1	14,1	18,8	32,0	2,9

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	30405	2317	64	105695	1627	645	3668	2
	MJ	6157	65	12	33918	65,7	8,5	1231	<ld
	1:5	3,8	1,1	1	1	0,004	0,01	<ld	<ld
	Ácida	14752	1485	28,2	5248	3,97	49,5	1386	<ld
	Oxidante	4629	342	7,4	60	1,9	10,4	1658	<ld

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
A5	2	4	12	34	0,1	10	2	5	0,4	0,5	13	14,2

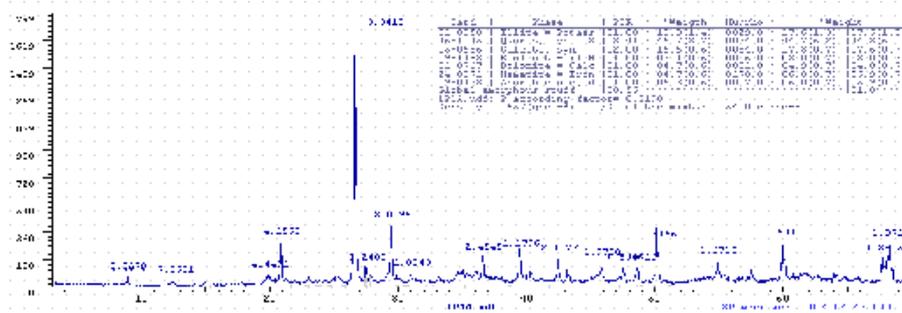
Ecotoxicidad	A5	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	100	
<i>L. sativum</i>	100	
<i>S. alba</i>	100	
<i>H. incongruens</i>	100	

A6 SEDIMENTO

	Descripción macromorfológica	Marrón (10YR 3/3) en húmedo y Marrón amarillento (10YR 5/4) en seco.
		Estructura moderada en bloques subangulares finos. Adherente; Plástico; Firme; Muy duro.

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
A6	8,6	7,9	189	0,4	15,3	1,6

Mineralogía (%)	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Hem	Cal	Dol	Amorfo
A6	17	3	6	44	6	18	5	1



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
A6	Húmedo	3,1	32,6	12,2	13,5	17,8	7,5	7,7	5,5
	Seco	6,1	20,3	9,5	10,1	18,9	22,8	12,3	-

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	5455	2130	42	64991	1235	299	1992	794
	MJ	635	49	12	26399	74,4	16,7	457	<ld
	1:5	<ld	6	<ld	<ld	0,016	0,15	<ld	<ld
	Ácida	1238	1960	20	699	8,3	14,2	355	<ld
	Oxidante	110	241	4,4	122	6	6,9	306	<ld

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
A6	0,4	2	13	42	0,2	1	2	7	0,5	0,2	10	12,8

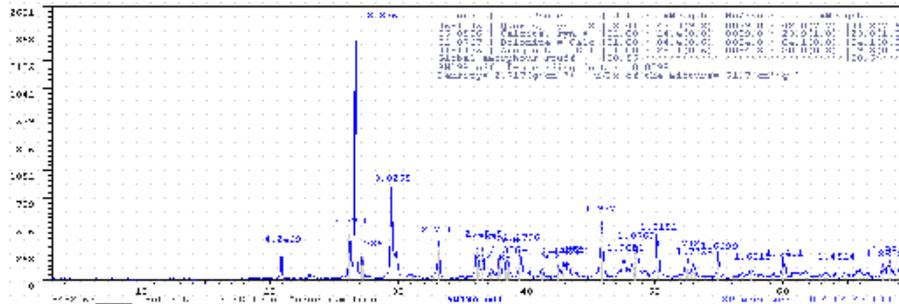
Ecotoxicidad	A6	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	10	14,05
<i>L. sativum</i>	10	0,49
<i>S. alba</i>	10	1,18
<i>H. incongruens</i>	8,33	0,52

A8 SEDIMENTO

	Descripción macromorfológica	Gris oscuro (10YR 3/1) en húmedo y Gris oscuro (10YR 4/1) en seco. Sin estructura. No adherente; No plástico; Friable; Ligeramente duro.
---	-------------------------------------	---

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
A8	9,1	9,0	170	0,9	62,7	1,5

Mineralogía (%)	Qtz	Hem	Dol	Arg	Amorfo
A8	29	2	4	64	1



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
A8	Húmedo	0,03	0,2	0,2	0,2	2,4	46,7	40,6	9,6
	Seco	-	-	-	-	2,6	36,2	17,0	44,4

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	516	25	2	2698	67	27	397	<ld
	MJ	37	11	0,6	1184	1	11,6	151	<ld
	1:5	<ld	0,005	<ld	<ld	0,008	1	<ld	<ld
	Ácida	65	23	0,02	62	0,2	2,5	116	<ld
Oxidante	32	15	0,2	87	0,5	24	23	<ld	

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
A8	0,3	1	1	28	0,03	1	0,2	42	0,1	0,1	1	34,4

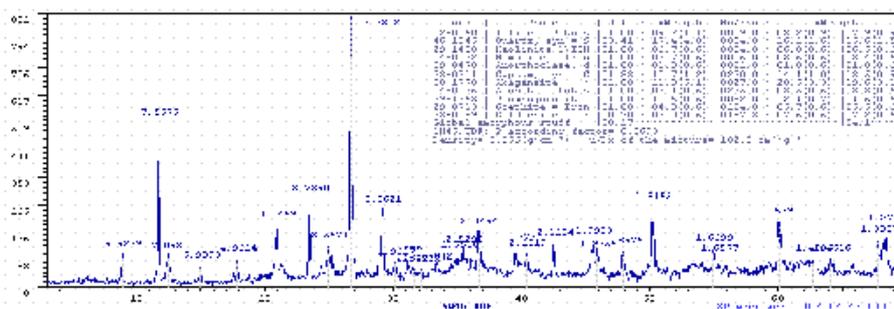
Ecotoxicidad	A8	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	0	0,22
<i>L. sativum</i>	0	8,06
<i>S. alba</i>	0	22,44
<i>H. incongruens</i>	13,3	8,92

A9 SEDIMENTO

	Descripción macromorfológica	Marrón grisáceo muy oscuro (10YR 3/4) en húmedo y Marrón amarillento (10YR 5/6) en seco. Sin estructura, Ligeramente adherente; Plástico; Friable; Ligeramente duro.
---	-------------------------------------	---

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
A9	7,2	6,9	305	2,6	<ld	<ld

Mineralogía (%)	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Gp	Jar	Hem	Gt	Aka	Alu	Gol	Amorfo
A9	8	7	2	29	14	12	3	5	6	3	7	4



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
A9	Húmedo	2,1	26,3	16,2	14,7	20,7	10,9	8,2	0,8
	Seco	2,6	12,1	8,8	8,9	24,1	15,8	27,6	0,3

Elementos traza		Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Hg
		mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	µg/kg
	Total	7274	2919	48	195926	782	165	3395	<ld
	MJ	2147	71	11,7	39247	87,1	12	493	<ld
	1:5	1,5	0,1	0,02	1	0,001	0,08	<ld	<ld
Ácida	2689	872	41	1208	9,5	13	210	<ld	
Oxidante	168	246	9,2	110	1,7	0,6	924	<ld	

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
A9	0,2	2	12	34	0,1	7	1	4	0,5	0,3	22	12,1

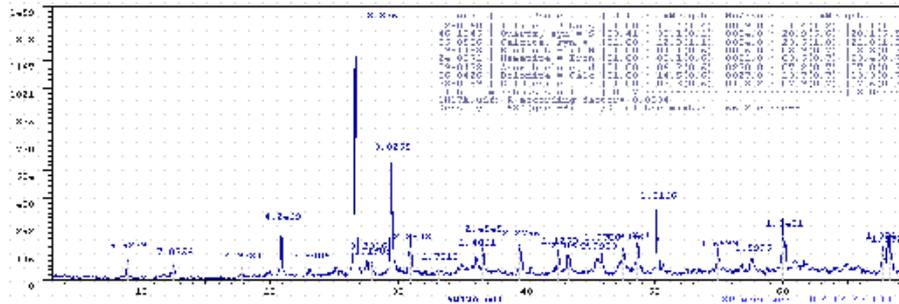
Ecotoxicidad	A9	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	0	16,02
<i>L. sativum</i>	40	0
<i>S. alba</i>	50	72,37
<i>H. incongruens</i>	23,3	20,62

A10 SEDIMENTO

	Descripción macromorfológica	Marrón amarillento oscuro (10YR 4/4) en húmedo y Marrón claro (10YR 6/3) en seco. Estructura débil migajosa mediana. Ligeramente adherente; Ligeramente plástico; Muy friable; Ligeramente duro.
---	-------------------------------------	---

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
A10	8,22	8,0	108	1,9	16,1	<ld

Mineralogía (%)	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Hem	Cal	Dol	Gol	Amorfo
A10	11	4	7	28	3	23	13	8	3



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
A10	Húmedo	3,5	17,4	6,1	9,2	17,1	23,4	22,4	0,9
	Seco	2,7	12,4	8,1	9,2	17,8	23,3	26,2	0,3

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	9734	788	14	100665	384	287	2279	1423
	MJ	611	142	4,5	22071	45,2	12,2	171	<ld
	1:5	0,3	1,2	0,003	1,6	0,001	0,3	2,8	<ld
	Ácida	1455	500	8	50	1,7	13,2	750	<ld
Oxidante	677	459	11,8	117	0,7	8,2	1059	<ld	

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
A10	0,5	3	8	35	0,2	1	1	18	0,4	0,3	12	17,6

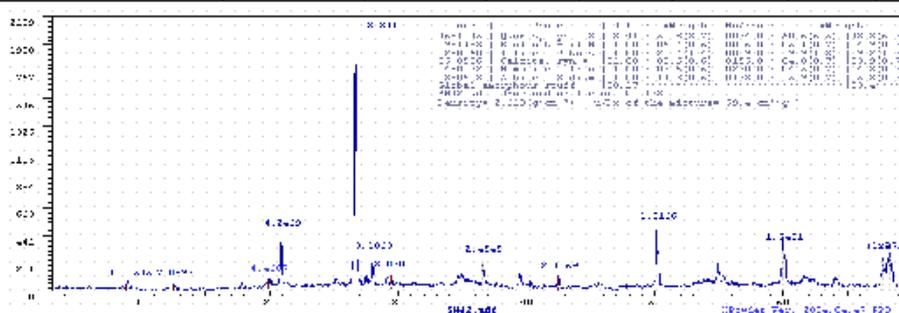
Ecotoxicidad	A10	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	0	0,46
<i>L. sativum</i>	0	0
<i>S. alba</i>	0	0
<i>H. incongruens</i>	53,3	

A11 SEDIMENTO

	Descripción macromorfológica	Marrón oscuro (7,5YR 3/4) en húmedo y Marrón fuerte (7,5Y 4/6) en seco. Sin estructura. Adherente; Plástico; Friable; Blando.
---	-------------------------------------	---

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
A11	8,3	7,5	169	5,3	3,1	1,0

Mineralogía (%)	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Hem	Cal	Amorfo
A11	19	5	15	49	4	4	4



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
A11	Húmedo	0,5	2,3	3,8	9,2	27,1	21,8	25,3	10,1
	Seco	0,5	2,5	4,0	9,5	28,7	21,9	23,6	9,4

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	3749	4620	108	140581	449	127	2952	179
	MJ	848	19	12,6	19022	27,6	16	848	<ld
	1:5	0,5	0,01	<ld	<ld	0,07	0,06	<ld	<ld
	Ácida	2383	2804	31,3	1168	4,7	21,5	397	<ld
	Oxidante	187	95	2,8	95	3,1	5	654	<ld
DTPA	363	228	4,4	80	0,09	9	59	<ld	

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
A11	0,3	2	15	52	0,3	1	3	2	0,6	0,3	13	8,9

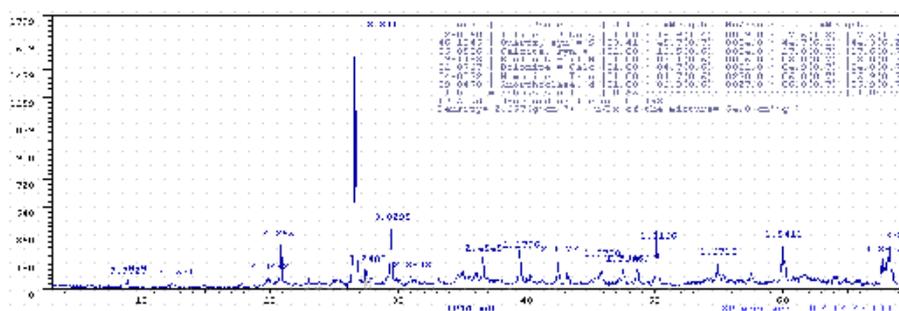
Ecotoxicidad	A11	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	10	29,30
<i>L. sativum</i>	0	0,69
<i>S. alba</i>	20	11,52
<i>H. incongruens</i>	61,6	

A12 SEDIMENTO

	Descripción macromorfológica	Marrón (10YR 3/3) en húmedo y Marrón amarillento (10YR 5/4) en seco. Estructura moderada en bloques subangulares finos. Adherente; Plástico; Firme; Muy duro.
---	---	--

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
A12	8,1	7,7	189	1,8	15,3	1,6

Mineralogía (%)	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Hem	Cal	Dol	Amorfo
A12	17	3	6	44	6	18	5	1



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
A12	Húmedo	3,1	32,6	12,2	13,5	17,8	7,5	7,7	5,5
	Seco	6,1	20,3	9,5	10,1	18,9	22,8	12,3	-

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	5450	2133	40	64990	1230	300	1990	799
	MJ	635	49	12	26399	74,4	16,7	457	<ld
	1:5	<ld	6	<ld	<ld	0,016	0,15	<ld	<ld
	Ácida	1238	1960	20	699	8,3	14,2	355	<ld
Oxidante	110	241	4,4	122	6	6,9	306	<ld	

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
A12	0,5	2	11	44	0,1	1	3	6	0,5	0,2	10	12,8

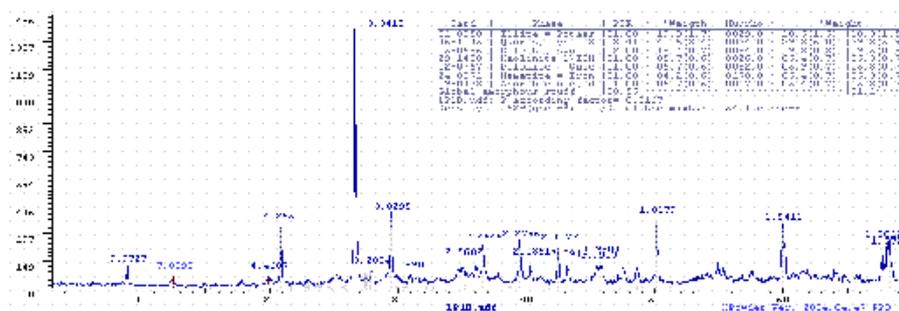
Ecotoxicidad	A12	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	10	14,05
<i>L. sativum</i>	10	0,49
<i>S. alba</i>	10	1,18
<i>H. incongruens</i>	8,0	0

A13 SEDIMENTO

	Descripción macromorfológica	Marrón oscuro (7,5YR 3/4) en húmedo y Marrón claro (7,5YR 6/3) en seco. Estructura moderada en bloques subangulares finos. Ligeramente adherente; Plástico; Firme; Duro.
---	-------------------------------------	--

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
A13	8,2	7,8	228	2,0	25,0	1,2

Mineralogía (%)	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Hem	Cal	Dol	Amorfo
A13	19	5	5	39	5	20	6	1



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
A13	Húmedo	0,6	8,7	6,0	15,2	28,5	14,5	15,4	11,1
	Seco	7,2	25,1	10,2	9,7	16,7	12,4	18,7	-

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	5234	2380	30	94340	1480	180	2039	1099
	MJ	576	68	12	23023	60,6	13,8	502	<ld
	1:5	<ld	6,9	<ld	8,1	0,02	1	<ld	<ld
	Ácida	1130	2011	21,7	467	5	13,9	402	<ld
Oxidante	98	162	3,9	62	5,9	6,1	217	<ld	

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
A13	0,4	2	13	42	0,2	1	2	7	0,5	0,2	10	14,2

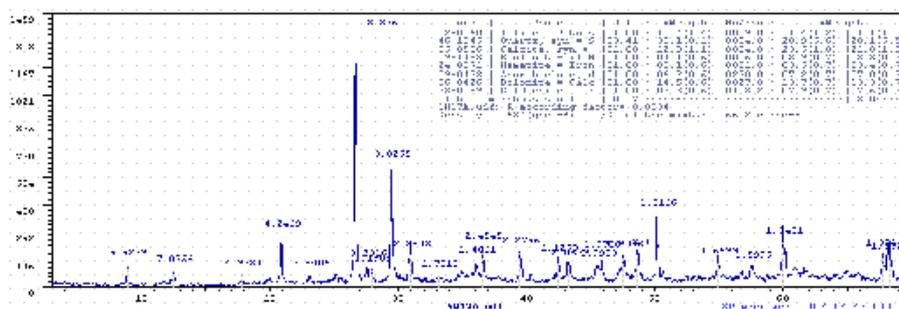
Ecotoxicidad	A13	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	10	14,05
<i>L. sativum</i>	10	0,49
<i>S. alba</i>	10	1,18
<i>H. incongruens</i>	8,33	0

A14 SEDIMENTO

	Descripción macromorfológica	Marrón amarillento oscuro (10YR 4/4) en húmedo y Marrón claro (10YR 6/3) en seco. Estructura débil migajosa mediana. Ligeramente adherente; Ligeramente plástico; Muy friable; Ligeramente duro.
---	-------------------------------------	---

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
A14	8,2	8,1	108	1,7	16,1	<ld

Mineralogía (%)	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Hem	Cal	Dol	Gol	Amorfo
A14	9	6	8	27	3	24	12	8	3



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
A14	Húmedo	3,5	17,4	6,1	9,2	17,1	23,4	22,4	0,9
	Seco	3,4	12,1	8,1	9,2	17,4	23,1	26,4	0,3

Elementos traza		Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Hg
		mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	µg/kg
	Total	9700	790	10	100665	385	288	2280	1420
	MJ	611	142	4,5	22071	45,2	12,2	171	<ld
	1:5	0,3	1,2	0,003	1,6	0,001	0,3	2,8	<ld
Ácida	1450	500	8,8	50	1,7	13,2	750	<ld	
Oxidante	670	459	5,8	117	0,7	8,2	1059	<ld	

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
A14	0,5	2	9	36	0,2	1	1	16	0,4	0,3	13	17,6

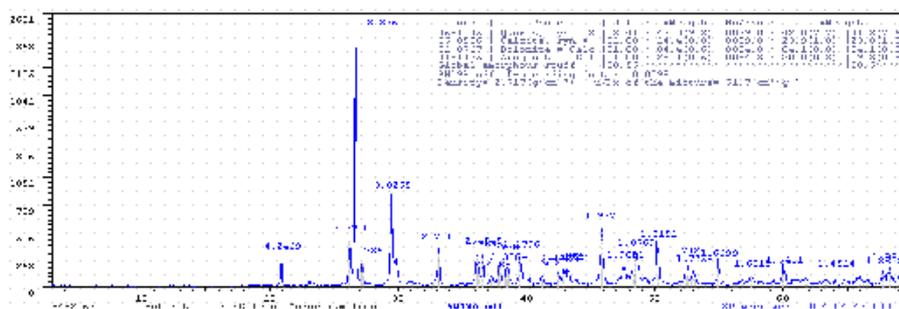
Ecotoxicidad	A14	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	0	0,50
<i>L. sativum</i>	0	0
<i>S. alba</i>	0	0,52
<i>H. incongruens</i>	63,3	

A15 SEDIMENTO

	Descripción macromorfológica	Gris muy oscuro (10YR 3/1) en húmedo y Gris oscuro (10YR 4/1) en seco. Sin estructura. No adherente; No plástico; Friable; Ligeramente duro.
---	-------------------------------------	--

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
A15	8,7	8,2	170	6,2	68,5	1,5

Mineralogía (%)	Qtz	Hem	Dol	Arg	Amorfo
A15	22	2	3	62	1



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
A15	Húmedo	0,03	0,2	0,2	0,2	2,4	46,7	40,6	9,6
	Seco	-	-	-	-	2,6	36,2	17,0	44,4

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	500	20	2	2698	67	27	397	<ld
	MJ	37	11	0,6	1184	1	11,6	151	<ld
	1:5	<ld	0,005	<ld	<ld	0,008	1	<ld	<ld
	Ácida	66	23	0,02	62	0,2	2,5	116	<ld
Oxidante	33	15	0,2	87	0,5	24	23	<ld	

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
A15	1	20	0,02	1	0,2	40	0,1	0,1	1	35,1	0,3	1

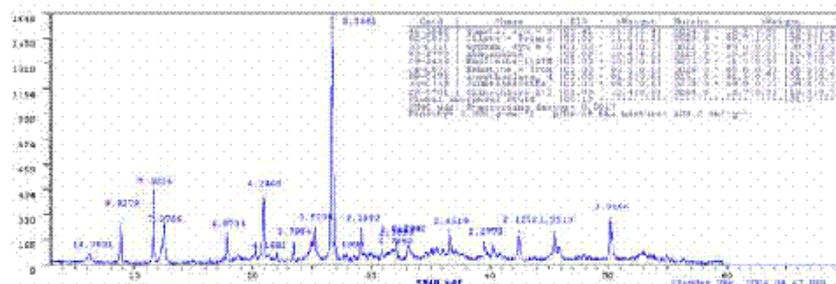
Ecotoxicidad	A15	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	0	0,22
<i>L. sativum</i>	0	8,06
<i>S. alba</i>	0	22,44
<i>H. incongruens</i>	13,3	8,92

B1 SUELO

	Descripción macromorfológica	Marrón grisáceo oscuro (2,5Y 4/2) en húmedo y Marrón oliva claro (2,5Y 5/3) en seco. Estructura débil granular fina. Adherente; Plástico; Muy friable; Blando.
---	-------------------------------------	--

	pH H₂O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)	CaCO₃ (%)	MO (%)
B1	5,0	4,8	299	7,4	<ld	<ld

Mineralogía (%)	Filo14	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Gp	Jar	Hem	Aka	Amorfo
B1	14	9	11	2	28	9	10	5	11	1



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
B1	Húmedo	0,9	4,7	4,3	7,3	16,7	11,9	16,1	38,2
	Seco	0,9	4,5	4,3	7,2	17,1	11,9	16,2	37,9

Elementos traza		Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Hg
		mg/kg	µg/kg						
	Total	8984	3989	88	251465	752	142	4053	178
	MJ	2246	54	11,6	11619	50,2	13,9	1799	<ld
	1:5	3575	5,9	12,1	5,4	0,05	2,3	1970	<ld
	Ácida	7002	592	52,8	7643	15,7	20,7	3945	<ld
D. viscosa	Oxidante	2909	60	19,2	206	4,6	18,7	2564	<ld
	DTPA	410	352	8,4	105	0,08	7,0	215	<ld
G. flavum	Raíz	233	99	6,4	1213	2,8	4	62	56,6
	Hojas	2374	1312	92,4	52599	110	25	1107	493,5
G. flavum	Raíz	346,5	47	1,1	223	<ld	8,8	121	<ld
	Hojas	360	52,4	1,4	238	<ld	10,5	148	<ld

FRX (%)	Na₂O	MgO	Al₂O₃	SiO₂	P₂O₅	SO₃	K₂O	CaO	TiO₂	MnO	Fe₂O₃	1000°C
B1	0,3	4	11	34	0,1	8	1	2	0,4	1	21	16,2

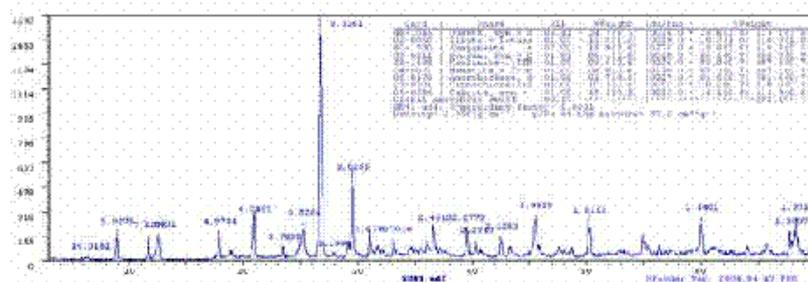
Ecotoxicidad	B1	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	20	32,15
<i>L. sativum</i>	10	35,32
<i>S. alba</i>	10	57,77
<i>H. incongruens</i>	100	

B2 SUELO

	<p>Descripción macromorfológica</p> <p>Marrón grisáceo muy oscuro (2,5Y 3/2) en húmedo y Marrón oliva (2,5Y 4/3) en seco. Sin estructura. No adherente; No plástico; Suelto; Suelto.</p>
---	---

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
B2	7,4	7,1	136	2,8	10,1	<ld

Mineralogía (%)	Filo14	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Gp	Hem	Cal	Aka	Amorfo
B2	10	10	8	2	29	6	7	14	12	2



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
B2	Húmedo	0,4	5,7	3,7	6,3	28,8	27,8	19,4	7,8
	Seco	1,8	8,5	7,9	15,2	42,2	14,0	10,4	0,1

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	3153	1241	123	261084	669	123	3498	159
	MJ	1032	41	9,2	18570	19,3	10,8	1582	<ld
	1:5	<ld	1,1	<ld	1,1	0,070	0,04	<ld	<ld
	Ácida	1279	581	17,8	7829	6,8	16,7	1066	<ld
	Oxidante	155	15	4,3	159	1,1	8,9	736	<ld
	DTPA	170	121	2	90	0,08	2,2	53	<ld
D. viscosa	Raíz	133	80	2,8	976,5	0,6	13,9	30	304,5
	Hojas	212	173	67	1310	7,2	6,2	74,6	280
Z. fabago	Raíz	142	46	2,8	360	<ld	3,3	11,5	259
	Hojas	454	86	2,7	370	1,9	24,4	94	1,4

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
B2	0,4	4	10	36	0,1	5	1	6	0,4	1	26	10,1

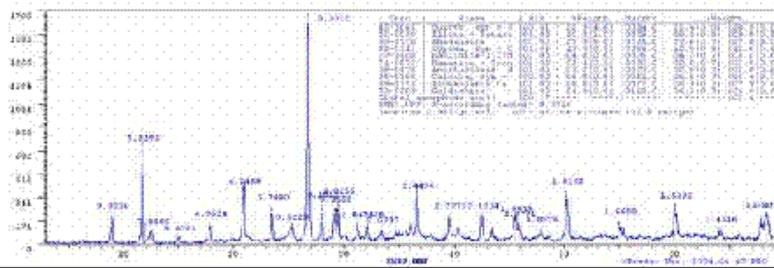
Ecotoxicidad	B2	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	10	56,03
<i>L. sativum</i>	10	11,72
<i>S. alba</i>	20	39,03
<i>H. incongruens</i>	5	28,38

B3 SUELO

	Descripción macromorfológica	Marrón oscuro (10YR 3/3) en húmedo y Marrón (10YR 4/3) en seco. Sin estructura. Ligeramente adherente; No plástico; Muy friable; Blando.
---	-------------------------------------	--

B3	pH H₂O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)	CaCO₃ (%)	MO (%)
	7,8	7,5	178	2,9	1,0	<ld

Mineralogía (%)	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Gp	Jar	Hem	Cal	Gol	Aka	Amorfo
B3	9	4	3	34	13	8	3	6	4	14	2



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
B3	Húmedo	0,06	1,8	1,8	4,8	31,0	28,5	18,8	13,2
	Seco	1,8	7,4	5,5	11,3	36,9	37,1	0,1	0,1

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	7958	3621	34	192308	454	124	3537	404
	MJ	2882	47	10	23586	4,2	20,4	1419	<ld
	1:5	0,5	5,6	0,8	1,7	0,002	0,3	<ld	<ld
	Ácida	8	48	0,1	71	0,002	4,3	3	<ld
	Oxidante	385	101	14	230	2	1,9	721	<ld
Z. fabago	Raíz	194	35	4,2	329,5	<ld	11	<ld	386
	Hojas	1073	157	7,6	1104	2,6	17	112	133
L. carthaginens	Raíz	272	136	4,9	564	1,8	8	22	77
	Hojas	491	167	5,7	1273	2,4	12,2	27	119

FRX (%)	Na₂O	MgO	Al₂O₃	SiO₂	P₂O₅	SO₃	K₂O	CaO	TiO₂	MnO	Fe₂O₃	1000°C
B3	1,0	2	10	35	0,1	10	1	6	1	0,5	21	10,7

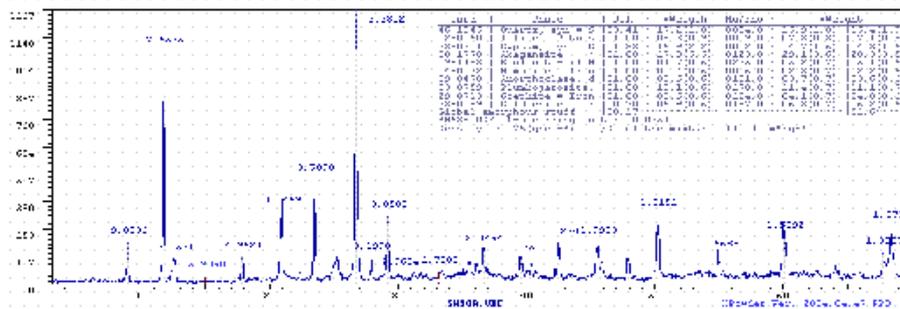
Ecotoxicidad	B3	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	80	52,23
<i>L. sativum</i>	100	
<i>S. alba</i>	100	
<i>H. incongruens</i>	8,3	36,19

B4 SUELO

	Descripción macromorfológica	Marrón oscuro (10YR 3/3) en húmedo y Marrón grisáceo oscuro (10YR 4/2) en seco. Sin estructura. Adherente; Plástico; Friable; Suelto.
---	-------------------------------------	---

	pH H₂O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)	CaCO₃ (%)	MO (%)
B4	6,9	6,4	282	1,4	1,0	1,1

Mineralogía (%)	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Gp	Jar	Hem	Gt	Aka	Gol	Amorfo
B4	7	5	4	30	14	11	2	4	14	6	3



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
B4	Húmedo	0,1	1,8	2,6	8,1	45,0	33,9	6,7	1,8
	Seco	2,0	8,0	5,5	10,8	34,6	19,2	19,6	0,3

Elementos traza		Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Hg
		mg/kg	µg/kg						
	Total	7062	4741	19	245292	561	127	3766	16
	MJ	3103	35	6,9	24074	5,1	10,6	1197	<ld
	1:5	5,9	2,7	0,7	0,8	0,002	0,01	1,2	<ld
	Ácida	68	33	4,4	18	0,05	11,7	13	<ld
Oxidante	1456	87	13,6	178	0,7	1,9	1893	<ld	
DTPA	142	157	1,2	31	0,1	1,1	77	<ld	
D. viscosa	Raíz	232	248	13,4	327	5,4	27	46	7,9
	Hojas	2453	2411	14	243	85	40	446	243

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
B4	1,0	2	9	35	0,1	10	1	4	1	1	26	9,7

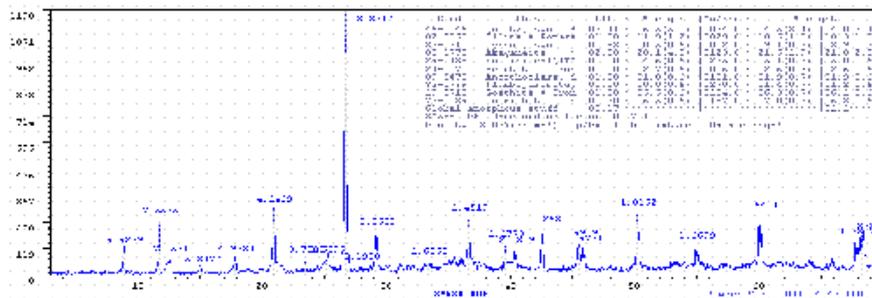
Ecotoxicidad	B4	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	0	1,22
<i>L. sativum</i>	0	0
<i>S. alba</i>	0	4,52
<i>H. incongruens</i>	36,7	

B5 SUELO

	Descripción macromorfológica	Marrón oscuro (10YR 3/3) en húmedo y Marrón grisáceo oscuro (10YR 4/2) en seco. Sin estructura. Adherente; Plástico; Friable; Suelto.
---	-------------------------------------	---

	pH H₂O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)	CaCO₃ (%)	MO (%)
B5	6,6	6,4	255	1,7	<ld	1,0

Mineralogía (%)	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Gp	Jar	Hem	Gt	Aka	Gol	Amorfo
B5	10	5	2	33	9	11	3	6	12	7	2



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
B5	Húmedo	0	0,8	1,4	4,8	39,7	38,6	10,9	3,7
	Seco	1,3	5,2	4,8	10,3	39,5	23,1	13,8	2,2

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	7239	6757	20	242278	530	145	3378	14
	MJ	2480	76	8,2	20800	3,8	12,4	920	<ld
	1:5	9,9	2,5	0,4	1	0,002	0,01	4	<ld
	Ácida	27	26	4,8	53	0,06	12,9	20	<ld
	Oxidante	190	76	8,1	146	0,9	2,1	1714	<ld
	DTPA	154	135	1,5	42	0,09	1,2	64	<ld
<i>L. carthagenensis</i>	Raíz	274	110	1,4	501	0,3	7,8	17,5	142
	Hojas	321	162	2,6	839	0,5	10	25	229

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
B5	1,0	2	9	35	0,1	10	1	4	1	1	26	12,6

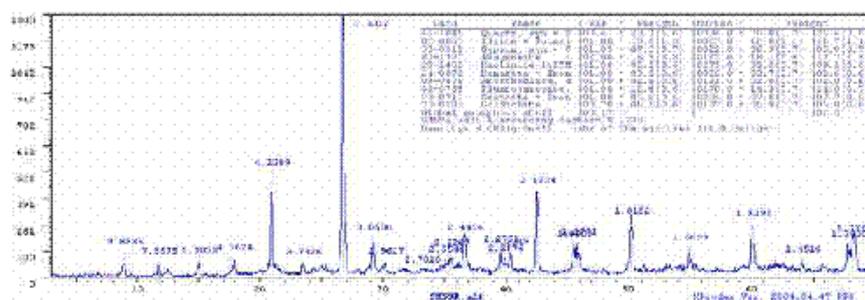
Ecotoxicidad	B5	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	0	3
<i>L. sativum</i>	0	0
<i>S. alba</i>	0	7,34
<i>H. incongruens</i>	36,7	

B6 SUELO

	Descripción macromorfológica	Marrón (10YR 4/3) en húmedo y Marrón (10YR 5/3) en seco. Estructura débil en bloques subangulares finos. No adherente; Ligeramente plástico; Firme; Duro.
---	-------------------------------------	---

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
B6	5,3	4,5	215	0,5	<ld	1,0

Mineralogía (%)	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Gp	Jar	Hem	Gt	Aka	Gol	Amorfo
B6	12	3	2	32	7	14	3	8	11	6	2



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
B6	Húmedo	0,2	1,7	1,8	5,4	36,6	31,7	16,8	5,8
	Seco	1,3	4,7	4,9	11,7	40,3	21,7	14,3	1,2

Elementos traza		Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Hg
		mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	µg/kg
	Total	4000	13500	15	192500	644	185	1390	413
	MJ	1785	765	3,8	63401	7,1	29	474	<ld
	1:5	72,4	2	1,4	0,7	0,001	0,005	14	<ld
	Ácida	367	36	2,3	53	0,03	6	44	<ld
Oxidante	138	44	3,7	161	2	<ld	171	<ld	
DTPA	279	104	1,2	108	0,3	2,4	100	<ld	
Z. fabago	Raíz	1113	200	4,9	1068	1,5	22,8	91	<ld
	Hojas	1034	66	5,3	263	<ld	28,2	70,5	<ld

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
B6	0,4	1	11	41	0,2	5	1	1	1	0,2	23	12,8

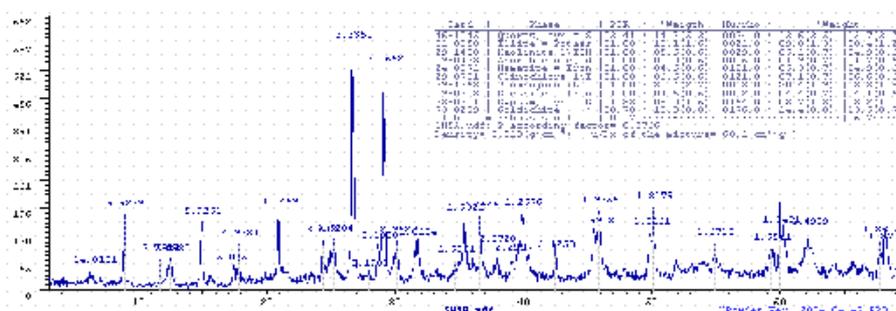
Ecotoxicidad	B6	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	0	15
<i>L. sativum</i>	50	10,02
<i>S. alba</i>	20	8,46
<i>H. incongruens</i>	100	

B7 SEDIMENTO

	<p>Descripción macromorfológica</p> <p>Marrón oliva (2,5Y 4/4) en húmedo y Marrón oliva claro (2,5Y 5/4) en seco. Estructura moderada en bloques gruesos. No adherente; No plástico; Friable; Ligeramente duro.</p>
---	--

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
B7	3,3	3,0	339	2,8	<ld	<ld

Mineralogía (%)	Filo14	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Gp	Jar	Hem	Gt	Gol	Amorfo
B7	7	8	5	2	13	8	28	5	4	13	7



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
B7	Húmedo	6,1	18,8	12,8	17,7	27,0	13,2	4,3	0,03
	Seco	9,2	23,7	7,5	1,5	25,1	10,6	22,5	-

Elementos traza		Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Hg
		mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	µg/kg
	Total	8867	26847	44	170443	3466	999	1133	1
	MJ	2955	122	13	52276	143,5	1,6	201	<ld
	1:5	1722	6,3	1,6	2	0,024	1,8	435,4	<ld
Ácida	1351	833	39,2	1092	5,96	11	563	<ld	
Oxidante	1081	237	13,5	725	0,6	4,5	495	<ld	

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
B7	0,4	1	11	29	0,1	9	1	1	0,3	0,2	22	20,5	0,4

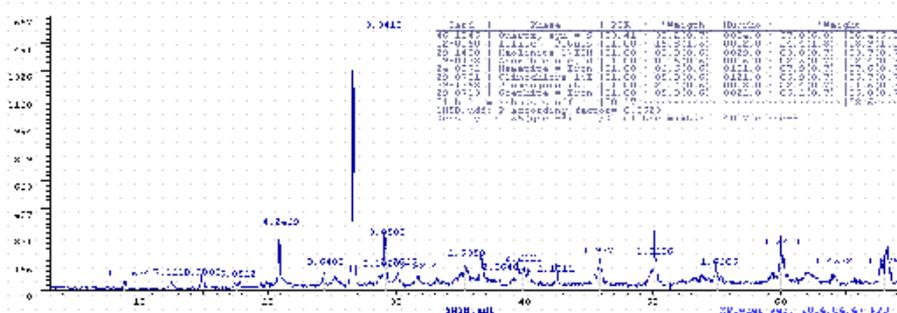
Ecotoxicidad	B7	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	80	44,84
<i>L. sativum</i>	70	50,25
<i>S. alba</i>	60	77,37
<i>H. incongruens</i>	100	

B8 SEDIMENTO

	Descripción macromorfológica	Marrón amarillento (10YR 5/4) en húmedo y Marrón claro (10YR 6/3) en seco. Estructura moderada en bloques finos. Adherente; Plástico; Friable; Blando.
		(Empty cell for additional description)

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
B8	3,2	2,9	412	0,6	<ld	<ld

Mineralogía (%)	Filo14	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Jar	Hem	Gt	Amorfo
B8	5	14	4	2	36	22	8	5	4



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
B8	Húmedo	9,2	23,7	7,5	14,8	25,1	10,6	9,2	-
	Seco	6,3	15,0	0,4	0,5	23,7	16,8	37,2	0,1

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	9971	33804	39	173638	3211	434	1216	1099
	MJ	2116	72	12,3	51906	109	14	189	<ld
	1:5	181	9,9	1,3	2,8	0,023	1,7	112	<ld
	Ácida	1324	1875	0,1	1066	6,7	14,7	228	<ld
Oxidante	559	375	1	127	0,4	4,4	588	<ld	

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
B8	0,4	1	11	29	0,1	9	1	1	0,3	0,2	22	13,6	0,4

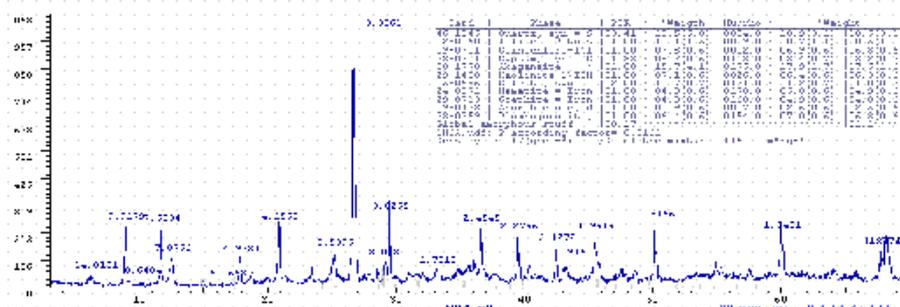
Ecotoxicidad	B8	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	0	30,84
<i>L. sativum</i>	0	50,36
<i>S. alba</i>	10	64,26
<i>H. incongruens</i>	100	

B9 SEDIMENTO

	Descripción macromorfológica	Marrón amarillento (10YR 5/8) en húmedo y Amarillo amarronado (10YR 6/8) en seco. Pocas manchas de color rosa (10R 6/8) y gris (7,5YR 5/1) medianas y definidas. Sin estructura. No adherente; No plástico; Firme; Firme.
		(Empty space for additional description)

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
B9	6,4	6,2	300	1,2	15,4	<ld

Mineralogía (%)	Filo14	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Gp	Jar	Hem	Cal	Gt	Aka	Amorfo
B9	7	10	6	3	27	8	7	5	11	5	9	2



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
B9	Húmedo	0,07	1,2	0,7	1,5	13,5	25,8	31,7	25,5
	Seco	0,8	2,2	1,2	1,5	13,2	24,3	35,7	21,2

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	7472	2016	43	183112	1417	658	11860	271
	MJ	910	74	8,4	13883	37,8	10,7	1101	<ld
	1:5	7,8	0,05	0,002	0,6	0,001	0,05	4,4	<ld
	Ácida	1250	1479	27,9	1125	3,2	8,8	479	<ld
Oxidante	667	417	12,5	225	1,1	8,3	2125	<ld	

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
B9	0,3	3	13	36	0,1	4	1	5	0,4	1	24	9,1	0,3

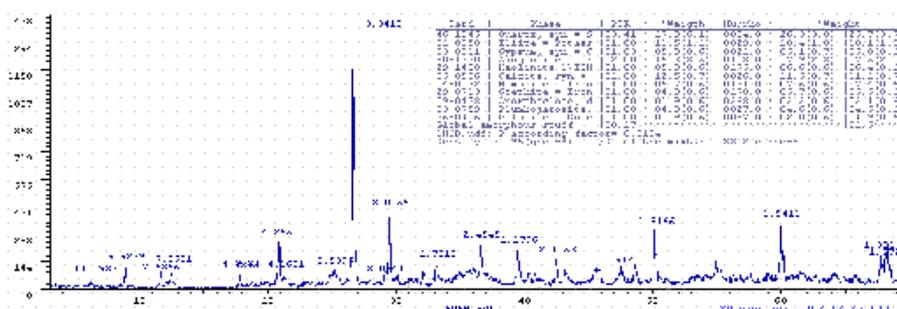
Ecotoxicidad	B9	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	0	18,15
<i>L. sativum</i>	0	4,51
<i>S. alba</i>	20	40,70
<i>H. incongruens</i>	71,6	

B10 SEDIMENTO

	<p>Descripción macromorfológica</p> <p>Marrón amarillento oscuro (10YR 4/4) en húmedo y Marrón amarillento (10YR 5/4) en seco, Pocas manchas de color Grises (7,5YR 5/1) pequeñas e indistintas. Sin estructura. No adherente; No plástico; Suelto; Suelto.</p>
---	--

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
B10	8,2	7,6	215	2,2	21,1	<ld

Mineralogía (%)	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Gp	Jar	Hem	Cal	Dol	Gt	Aka	Amorfo
B10	10	6	2	31	5	5	7	11	2	6	13	2



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
B10	Húmedo	0,03	0,9	0,7	1,5	18,1	33,5	30,3	15,0
	Seco	1,6	5,3	2,7	2,9	17,1	24	32,1	14,4

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	10088	2618	44	160965	1243	217	10965	274
	MJ	772	20	9,0	16007	13,2	15,7	1097	<ld
	1:5	<ld	0,05	0,001	1,3	0,002	0,7	<ld	<ld
	Ácida	7723	1980	37,1	1312	3,6	11,4	347	<ld
Oxidante	282	412	7,4	57	0,9	10,9	990	<ld	

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
B10	0,3	3	13	36	0,1	4	1	5	0,4	1	24	8,6	0,3

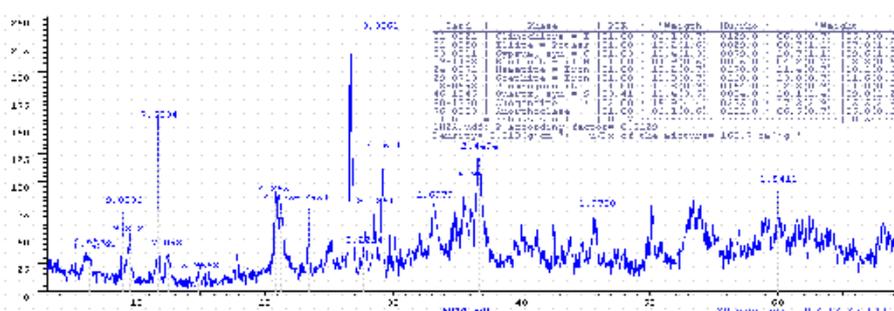
Ecotoxicidad	B10	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	20	21,89
<i>L. sativum</i>	0	1,26
<i>S. alba</i>	20	33,82
<i>H. incongruens</i>	25	32,68

B11 SEDIMENTO

	<p align="center">Descripción macromorfológica</p>	<p>Marrón amarillento oscuro (10YR 3/3) en húmedo y Marrón amarillento oscuro (10YR 3/4) en seco. Estructura débil en bloques subangulares finos. No adherente; No plástico; Muy friable; Ligeramente duro.</p>
---	---	---

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
B11	5,2	4,7	240	4,2	<ld	<ld

Mineralogía (%)	Filo14	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Gp	Jar	Hem	Gt	Aka	Amorfo
B11	5	8	4	6	19	10	11	10	11	6	11



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
B11	Húmedo	1,2	3,3	1,1	3,3	19,7	21	30,2	20
	Seco	0,3	1,4	0,8	1,3	6,4	13,8	43,2	33

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	11553	31885	32	358595	1528	379	9242	302
	MJ	1220	72	9	43318	61,7	12,6	1871	<ld
	1:5	26,4	2,0	2,3	1,3	0,03	1,2	558	<ld
	Ácida	631	653	0,2	1609	4	5,9	1349	<ld
Oxidante	545	990	4	162	2,4	0,4	5149	<ld	

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
B11	0,2	3	5	25	0,1	4	0,1	0,3	1	0,2	1	42	15,2

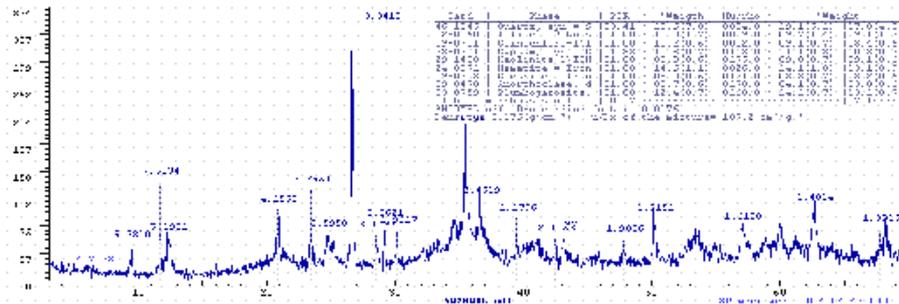
Ecotoxicidad	B11	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	20	31,95
<i>L. sativum</i>	0	27,68
<i>S. alba</i>	40	25,33
<i>H. incongruens</i>	100	

B12 SEDIMENTO

	<p>Descripción macromorfológica</p>	<p>Marrón amarillento oscuro (10YR 3/4) en húmedo y Marrón amarillento (10YR 5/6) en seco. Sin estructura. No adherente; No plástico; Muy friable; Ligeramente duro.</p>
---	--	--

	pH H₂O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)	CaCO₃ (%)	MO (%)
B12	5,5	4,6	233	1,0	<ld	<ld

Mineralogía (%)	Filo14	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Gp	Jar	Hem	Gt	Amorfo
B12	9	9	9	4	18	10	13	13	8	7



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
B12	Húmedo	0,8	2,8	1,6	2,9	14,6	23,8	38,1	15,6
	Seco	0,7	2,7	1,5	2,7	14,8	23,8	38,2	15,8

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	10595	18668	40	361251	1231	652	20182	101
	MJ	960	61	13,4	45533	70	3	1887	<ld
	1:5	47,5	0,01	0,02	<ld	0,02	1,2	85	<ld
	Ácida	3500	2600	19,0	3125	1,5	7	1038	<ld
Oxidante	101	850	2,5	104	1,6	3,4	750	<ld	

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
B12	0,2	3	5	25	0,1	4	0,1	0,3	1	0,2	1	42	12,7

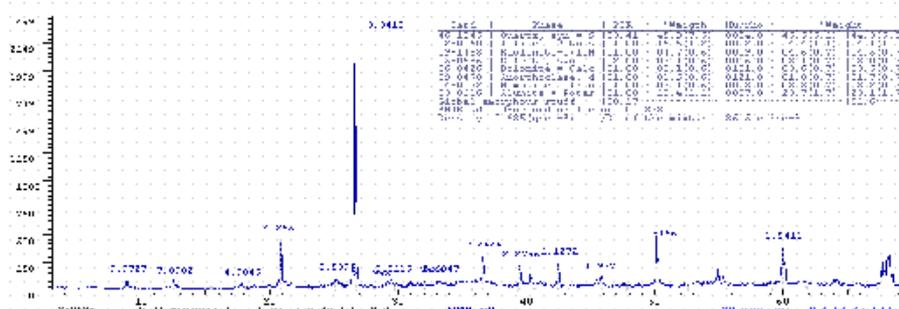
Ecotoxicidad	B12	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	10	29,95
<i>L. sativum</i>	0	27,38
<i>S. alba</i>	10	14,20
<i>H. incongruens</i>	100	

B13 SEDIMENTO

	Descripción macromorfológica	Marrón oscuro (10YR 3/3) en húmedo y Marrón oliva grisáceo (10YR 4/2) en seco. Presenta manchas de color marrón muy claro (10YR 7/3) y marrón rojizo (2,5YR 4/4) frecuentes, medianas y con límites netos. Sin estructura. No adherente; No plástico; Friable; Blando.
---	-------------------------------------	--

	pH H₂O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)	CaCO₃ (%)	MO (%)
B13	8,0	7,7	212	0,5	4,5	<ld

Mineralogía (%)	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Hem	Cal	Dol	Alu	Amorfo
B13	14	5	2	44	3	3	4	22	3



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
B13	Húmedo	0,8	4,9	2,4	4,8	26,6	31,2	19,6	9,7
	Seco	0	0	0	0	0	12,1	45,8	42,1

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	3107	3250	32	42304	107	30	23901	<ld
	MJ	1331	121	13,4	16659	48,0	8,2	1071	<ld
	1:5	<ld	3,1	0,001	<ld	0,002	1,9	<ld	<ld
	Ácida	2991	1317	31,3	2321	2,8	10,3	480	<ld
Oxidante	469	227	6,7	279	2,7	0,9	815	<ld	

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
B13	0,3	2	12	43	0,1	2	0,05	1	4	0,4	1	23	9,0

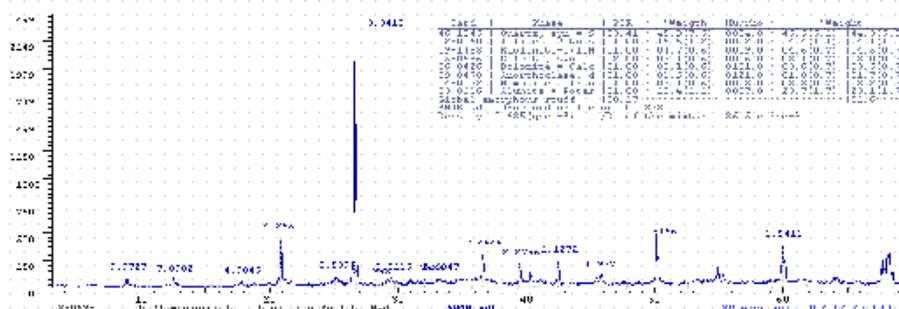
Ecotoxicidad	B13	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	10	8,93
<i>L. sativum</i>	0	8,99
<i>S. alba</i>	20	36,17
<i>H. incongruens</i>	11,66	28,38

B14 SEDIMENTO

	<p align="center">Descripción macromorfológica</p>	<p>Marrón oscuro (10YR 3/3) en húmedo y Marrón grisáceo (10YR 5/2) en seco. Sin estructura. Ligeramente adherente; No plástico; Muy friable; Blando.</p>
---	---	--

	pH H₂O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)	CaCO₃ (%)	MO (%)
B14	7,8	7,7	238	0,7	3,9	<ld

Mineralogía (%)	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Hem	Cal	Dol	Alu	Amorfo
B14	14	5	3	43	3	3	4	22	3



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
B14	Húmedo	0,5	3,2	1,8	3,6	24,5	34,3	22	10
	Seco	0	0	0	0,4	16,7	19,8	63,1	0,2

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	14216	3431	39	176471	164	275	9804	1590
	MJ	1975	33	9,8	16310	47,6	19,7	1061	<ld
	1:5	1,1	0,02	<ld	0,7	0,003	<ld	0,9	<ld
	Ácida	5727	955	31,8	2614	4,11	15,5	1182	<ld
	Oxidante	1955	153	7,3	36	2,1	1,0	1041	<ld

FRX (%)	Na₂O	MgO	Al₂O₃	SiO₂	P₂O₅	SO₃	K₂O	CaO	TiO₂	MnO	Fe₂O₃	1000°C
B14	0,3	2	12	43	0,1	2	1	4	0,4	1	23	6,5

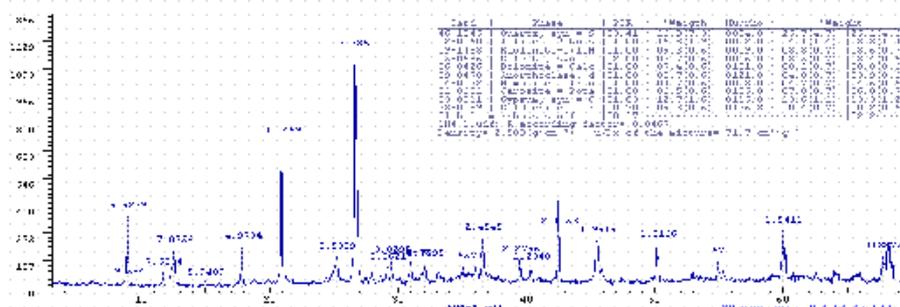
Ecotoxicidad	B14	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	10	4,60
<i>L. sativum</i>	0	23,85
<i>S. alba</i>	10	24,21
<i>H. incongruens</i>	100	

B15 SEDIMENTO

	<p>Descripción macromorfológica</p> <p>Marrón amarillento oscuro (10YR 3/4) en húmedo y Marrón claro amarillento (10YR 6/4) en seco. Estructura moderada migajosa media. Ligeramente adherente; Plástico; Firme; Duro.</p>
---	---

	pH H₂O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)	CaCO₃ (%)	MO (%)
B15	8,1	7,4	220	1,0	1,8	1,2

Mineralogía (%)	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Gp	Jar	Hem	Cal	Dol	Gol	Amorfo
B15	14	8	4	25	13	7	4	3	8	10	2



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
B15	Húmedo	0,1	22	6,6	19,8	30,7	15,1	5,4	0
	Seco	0,1	19,2	9,9	15,1	36,4	14,1	5,4	0

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	8458	3577	45	149751	1019	472	3731	186
	MJ	2127	67	9,4	36646	96,1	23,8	535	<ld
	1:5	0,5	<ld	0,001	<ld	0,002	0,65	<ld	<ld
	Ácida	8044	979	43,7	5959	7,4	41,7	1390	<ld
	Oxidante	4072	1018	15,9	8268	20,4	29,3	1961	<ld

FRX (%)	Na₂O	MgO	Al₂O₃	SiO₂	P₂O₅	SO₃	K₂O	CaO	TiO₂	MnO	Fe₂O₃	1000°C
B15	0,3	2	13	43	0,1	3	1	2	0,4	0,5	23	8,1

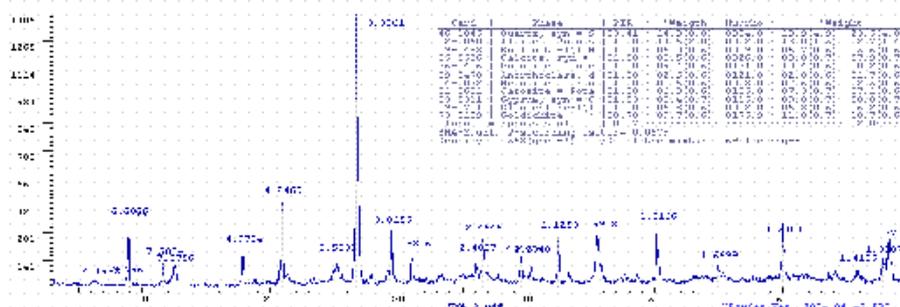
Ecotoxicidad	B15	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	30	69,73
<i>L. sativum</i>	20	0,67
<i>S. alba</i>	10	0,54
<i>H. incongruens</i>	26,6	39,56

B16 SEDIMENTO

	<p>Descripción macromorfológica</p>	<p>Marrón oscuro (10YR 3/3) en húmedo (adquiere brillo) y Marrón oscuro (10YR 3/4) en seco, Manchas de color marrón amarillento (10YR 5/4) y rosas (7,5YR 7/4) frecuentes, de tamaño mediano, indistintas y de límite difuso. Sin estructura. Ligeramente adherente; No plástico; Suelto; Suelto.</p>
---	--	---

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
B16	8,1	7,3	177	0,8	7,2	0,9

Mineralogía (%)	Filo14	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Gp	Jar	Hem	Cal	Dol	Gol	Amorfo
B16	6	13	6	3	23	9	7	2	8	10	11	2



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
B16	Húmedo	0,2	2,6	1,3	1,8	11,3	25,2	34,5	23,0
	Seco	-	0,5	0,4	0,7	2,3	8,7	19,0	68,6

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	7730	4092	43	151208	587	267	9662	748
	MJ	1081	30	10,4	22500	36,1	18,1	765	<ld
	1:5	<ld	0,2	0,003	<ld	0,002	2	<ld	<ld
	Ácida	4049	1220	37,6	1793	2,6	6,3	354	<ld
Oxidante	390	189	4,4	90	1,9	0,2	463	<ld	

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
B16	1,0	2	12	46	0,1	2	1	5	0,4	1	20	7,6	1,0

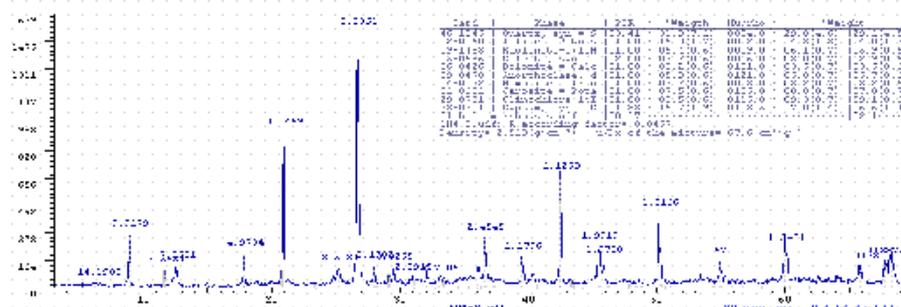
Ecotoxicidad	B16	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	10	4,58
<i>L. sativum</i>	10	20,31
<i>S. alba</i>	0	13,85
<i>H. incongruens</i>	3,3	0

B17 SEDIMENTO

	Descripción macromorfológica	Marrón oscuro (10YR 3/3) en húmedo (adquiere brillo) y Marrón amarillento oscuro (10YR 3/4) en seco. Estructura débil, prismática de tamaño medio. Ligeramente adherente; No plástico; Muy friable; Blando.
---	-------------------------------------	---

	pH H₂O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)	CaCO₃ (%)	MO (%)
B17	8,2	7,6	265	1,0	4,2	<ld

Mineralogía (%)	Filo14	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Gp	Jar	Hem	Cal	Dol	Amorfo
B17	9	14	6	6	29	17	8	3	3	3	2



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
B17	Húmedo	0,1	1,5	2	5,9	26	24,1	23,1	17,3
	Seco	0,7	2,7	3,9	8,7	26,6	22,5	24,5	10,4

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	6466	4612	34	111111	2600	206	3592	13
	MJ	1406	67	10,1	14063	71	23,6	911	<ld
	1:5	<ld	0,003	0,005	0,5	0,003	0,06	<ld	<ld
	Ácida	2477	1799	30,8	2605	9,4	19,2	923	<ld
Oxidante	397	166	7,9	109	1,1	1,6	701	<ld	

FRX (%)	Na₂O	MgO	Al₂O₃	SiO₂	P₂O₅	SO₃	K₂O	CaO	TiO₂	MnO	Fe₂O₃	1000°C
B17	1,0	2	12	45	0,1	3	1	4	0,5	1	21	8,1

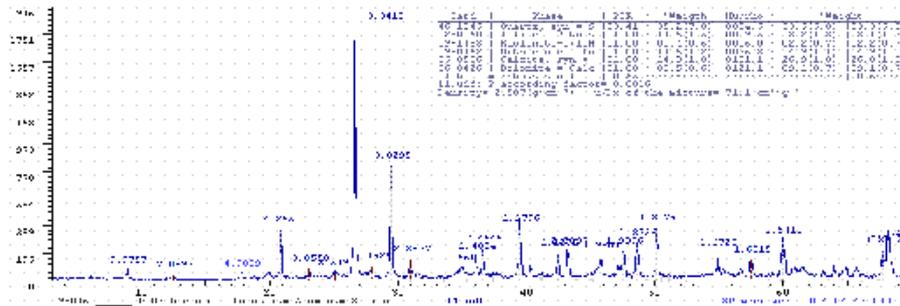
Ecotoxicidad	B17	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	0	0,47
<i>L. sativum</i>	10	1,74
<i>S. alba</i>	0	6,11
<i>H. incongruens</i>	0	0

B18 SEDIMENTO

	<p>Descripción macromorfológica</p>	<p>Marrón oscuro (7,5YR 3/4) en húmedo y Marrón (7,5YR 4/4) en seco. Estructura débil migajosa de tamaño medio. Adherente; No plástico; Muy friable; Ligeramente duro.</p>
---	--	--

	pH H₂O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)	CaCO₃ (%)	MO (%)
B18	8,3	8,0	213	0,6	15,1	1,5

Mineralogía (%)	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Cal	Dol	Amorfo
B18	13	2	15	34	26	9	1



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
B18	Húmedo	3,6	14,0	8,9	15,3	18,6	10,0	20,2	9,2
	Seco	1,1	5,9	5,1	8,9	15,5	14,7	31,8	17,2

Elementos traza		Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Hg
		mg/kg	µg/kg						
	Total	851	118	17	44685	200	22	1834	<ld
	MJ	51	45	7,0	9658	7,0	12,9	329	<ld
	1:5	<ld	<ld	<ld	1,0	0,006	0,02	<ld	<ld
	Ácida	25	15	0,2	7	0,39	<ld	102	<ld
Oxidante	15	17	2,0	64	2,6	1,0	404	<ld	
DTPA	7	8	0,4	6	0,06	1,6	70	<ld	

FRX (%)	Na₂O	MgO	Al₂O₃	SiO₂	P₂O₅	SO₃	K₂O	CaO	TiO₂	MnO	Fe₂O₃	1000°C
B18	0,3	2	12	43	0,2	0	2	17	1	0,2	6	16,3

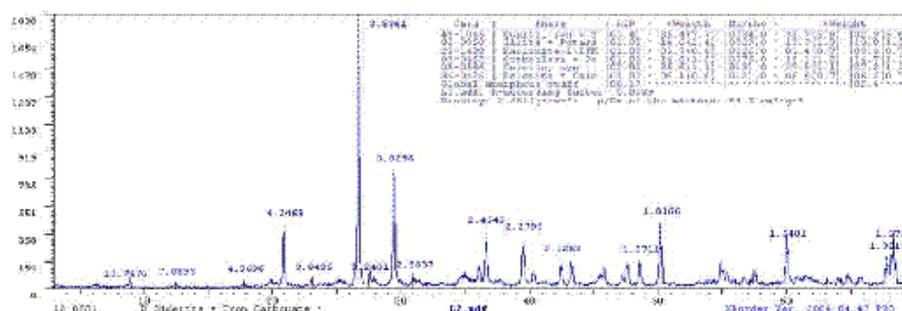
Ecotoxicidad	B18	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	0	39,8
<i>L. sativum</i>	0	4,7
<i>S. alba</i>	10	3,2
<i>H. incongruens</i>	20	25,8

B19 SEDIMENTO

	<p>Descripción macromorfológica</p>	<p>Marrón oscuro (7,5YR 3/4) en húmedo y Marrón (7,5YR 4/4) en seco. Estructura débil migajosa de tamaño medio. Adherente; No plástico; Muy friable; Ligeramente duro.</p>
---	--	--

	pH H₂O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)	CaCO₃ (%)	MO (%)
B19	7,9	8,0	138	0,8	41,5	1,7

Mineralogía (%)	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Cal	Dol	Amorfo
B19	13	3	15	33	27	7	2



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
B19	Húmedo	2,8	12,9	9,6	24,4	35,8	10,0	3,9	0,5
	Seco	0,6	2,5	2,9	6,7	14,6	13,0	29,3	30,5

Elementos traza		Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Hg
		mg/kg	µg/kg						
	Total	3247	465	18	1419	200	44	3247	<ld
	MJ	289	116	6,3	442	40,8	8,2	988	<ld
	1:5	<ld	0,01	<ld	<ld	0,013	0,83	<ld	<ld
	Ácida	373	452	11,0	84	0,45	6,5	204	<ld
Oxidante	43	34	1,3	68	4,0	1,8	515	<ld	
DTPA	54	36	1,5	4	0,05	2,4	30	<ld	

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
B19	0,3	3	12	43	0,2	1	2	13	1	1	10	14,0

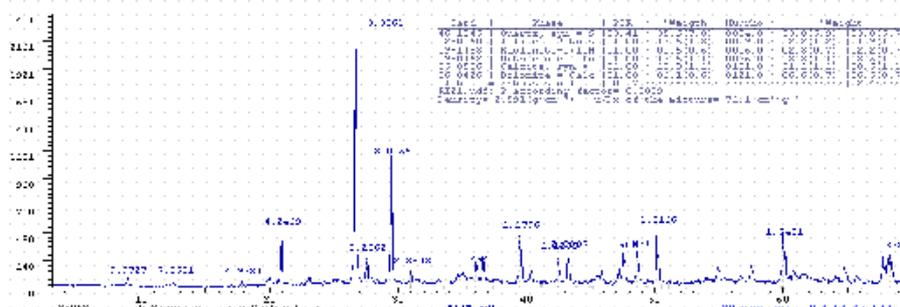
Ecotoxicidad	B19	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	0	35,6
<i>L. sativum</i>	10	24,3
<i>S. alba</i>	10	15
<i>H. incongruens</i>	8,3	10,8

B20 SEDIMENTO

	Descripción macromorfológica	Marrón (7,5YR 4/4) en húmedo y Marrón fuerte (7,5YR 5/6) en seco. Estructura débil granular fina. Ligeramente adherente; Ligeramente plástico; Friable; Ligeramente duro.
---	-------------------------------------	---

	pH H₂O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)	CaCO₃ (%)	MO (%)
B20	8,2	7,9	146	0,1	30,4	1,9

Mineralogía (%)	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Cal	Dol	Amorfo
B20	12	2	14	33	31	6	2



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
B20	Húmedo	1,8	1,4	1,2	4,6	12,7	12,2	29,0	37,1
	Seco	-	1,4	1,2	4,6	9,5	4,9	29,0	49,4

Elementos traza		Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Hg
		mg/kg	µg/kg						
	Total	2745	376	33	84075	297	99	4327	<ld
	MJ	179	53	10,0	8558	21,5	12,7	875	<ld
	1:5	<ld	0,01	<ld	1,0	0,017	<ld	<ld	<ld
	Ácida	190	511	9,3	95	0,16	3,7	170	<ld
Oxidante	19	36	0,1	40	2,0	2,1	299	<ld	
DTPA	35	30	1,0	5	0,65	3,1	47	<ld	

FRX (%)	Na₂O	MgO	Al₂O₃	SiO₂	P₂O₅	SO₃	K₂O	CaO	TiO₂	MnO	Fe₂O₃	1000°C
B20	0,3	2	12	43	0,2	0	2	17	1	0,2	6	14,1

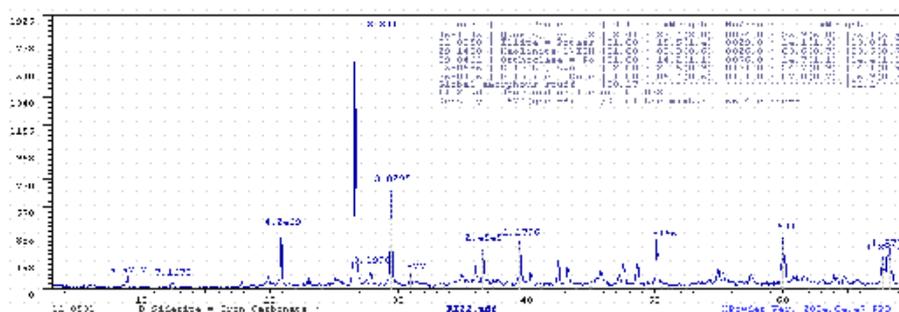
Ecotoxicidad	B20	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	0	21,8
<i>L. sativum</i>	0	13,7
<i>S. alba</i>	0	20,8
<i>H. incongruens</i>	8,3	16,28

B21 SEDIMENTO

	<p align="center">Descripción macromorfológica</p>	<p>Marrón amarillento oscuro (10YR 3/4) en húmedo y Marrón amarillento oscuro (10YR 4/4) en seco.</p>
		<p>Sin estructura. Ligeramente adherente; Ligeramente plástico; Muy friable; Duro.</p>

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
B21	8,5	8,0	142	0,5	6,5	1,6

Mineralogía (%)	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Cal	Dol	Amorfo
B21	14	4	14	35	24	7	2



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
B21	Húmedo	1,5	3,4	4,6	8,7	17,7	23,8	34,7	5,6
	Seco	0,9	3,9	3,6	8,7	16,5	23,2	42,6	0,6

Elementos traza		Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Hg
		mg/kg	µg/kg						
	Total	2388	392	34	64470	258	40	3534	<ld
	MJ	267	99	14,1	20474	11,9	5,5	736	<ld
	1:5	<ld	0,03	<ld	1,1	0,015	0,53	<ld	<ld
	Ácida	298	306	10,7	46	0,13	2,4	209	<ld
Oxidante	29	35	0,2	100	1,8	1,9	347	<ld	
DTPA	72	29	0,4	65	0,57	2,3	82	<ld	

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
B21	0,3	3	12	43	0,2	1	2	13	1	1	10	14,2

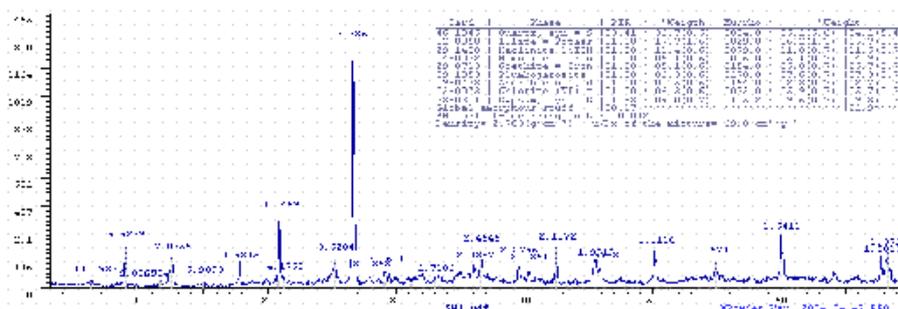
Ecotoxicidad	B21	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	0	17,9
<i>L. sativum</i>	0	39,6
<i>S. alba</i>	10	3,1
<i>H. incongruens</i>	20	31

C1 SEDIMENTO

	Descripción macromorfológica	Marrón oliva oscuro (2,5Y 3/3) en húmedo y Marrón oliva (2,5Y 4/4) en seco. Sin estructura. No adherente; Ligeramente plástico; Muy friable; Ligeramente duro.
---	-------------------------------------	--

C1	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
C1	7,4	7,1	114	1,8	<ld	<ld

Mineralogía (%)	Filo14	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Gp	Jar	Hem	Gt	Amorfo
C1	6	16	11	3	34	9	7	5	6	3



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
C1	Húmedo	7,3	24,0	11,2	11,7	24,9	10,9	9,0	1,1
	Seco	7,1	29,3	11,2	9,9	25,9	10,9	5,8	-

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	19942	2456	53	162451	3421	619	14591	127
	MJ	2000	53	9,8	43900	135,4	7,6	570	<ld
	1:5	1,5	1,0	0,01	<ld	0,03	<ld	11,8	<ld
	Ácida	8134	833	42,4	7934	7,12	39,4	1759	<ld
Oxidante	549	186	7,5	228	1,6	194,6	649	<ld	

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
C1	0,4	2	13	41	0,1	3	1	2	0,4	1	23	10,5

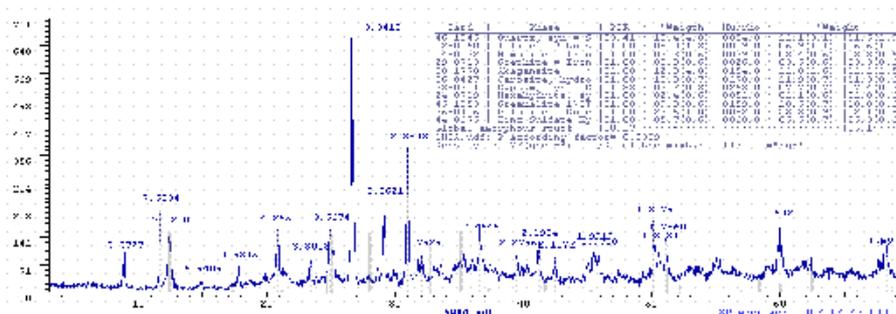
Ecotoxicidad	C1	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	0	16,29
<i>L. sativum</i>	20	1,65
<i>S. alba</i>	10	31,10
<i>H. incongruens</i>	36,6	-

C2 SEDIMENTO

	Descripción macromorfológica	Marrón amarillento oscuro (10YR 4/4) en húmedo y Marrón amarillento claro (10YR 6/4) en seco. Estructura débil migajosa fina. No adherente; No plástico; Duro; Ligeramente duro.
---	---	--

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
C2	7,65	7,55	189	2,6	<ld	<ld

Mineralogía (%)	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Gp	Jar	Hem	Dol	ZnSO ₄ ·nH ₂ O	Gt	Hex	Aka	Amorfo
C2	7	10	12	19	8	11	3	10	5	3	2	5	5



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
C2	Húmedo	0,8	64,6	24,4	5,4	3,8	0,5	0,1	0,1
	Seco	13,0	53,6	13,0	0,8	19,5	0,1	0,1	0,1

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	13375	3901	54	120623	1020	826	4864	1012
	MJ	2478	52	11,1	27952	167	11	1467	<ld
	1:5	262	0,6	0,01	1,1	0,002	0,06	<ld	<ld
	Ácida	8255	1002	46,7	4505	1,8	41	2583	<ld
Oxidante	896	71	9	106	0,2	4,2	708	<ld	

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
C2	0,3	3	14	32	0,1	5	1	5	0,4	1	21	15,2

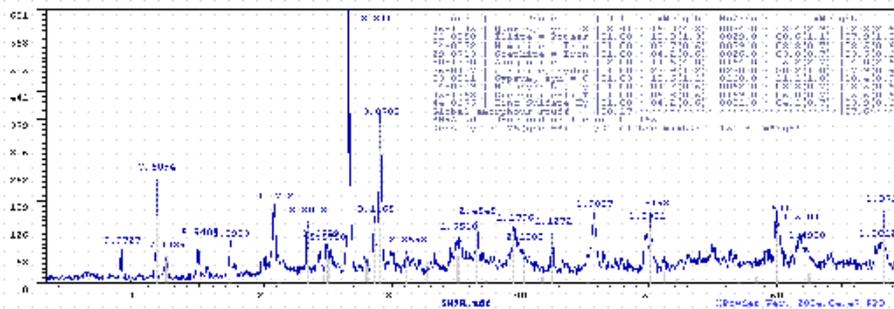
Ecotoxicidad	C2	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	30	2,25
<i>L. sativum</i>	20	8,76
<i>S. alba</i>	10	14,46
<i>H. incongruens</i>	100	

C3 SEDIMENTO

	<p align="center">Descripción macromorfológica</p>	<p>Marrón oliva (2,5Y 4/4) en húmedo y Marrón amarillento claro (2,5Y 6/4) en seco. Estructura fuerte prismática gruesa. No adherente; No plástico; Muy firme; Extremadamente duro.</p>
---	---	---

	pH H₂O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)	CaCO₃ (%)	MO (%)
C3	4,5	4,4	278	7,3	<ld	<ld

Mineralogía (%)	Filo10	Filo7	Qtz	Gp	Jar	Hem	Gt	Aka	Hexahid	Sulfato Zn Hidratad	Amorfo
C3	8	6	23	10	28	3	3	4	3	4	8



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
C3	Húmedo	0,2	11,4	10,6	17,3	30,8	15,7	10,0	3,7
	Seco	4,1	13,8	5,2	3,9	15,8	11,9	44,7	0,8

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	25273	3033	59	128345	458	225	1338	385
	MJ	5599	99	10,8	47903	112,6	7,1	259	<ld
	1:5	9932	4,3	24,2	4,4	0,002	1,11	266,5	<ld
	Ácida	13707	331	43,1	3017	5,5	40,5	916	<ld
	Oxidante	6983	20	21,6	431	0,2	29,3	474	<ld

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
C3	0,3	2	11	26	0,3	12	1	2	0,4	0,2	18	22,0

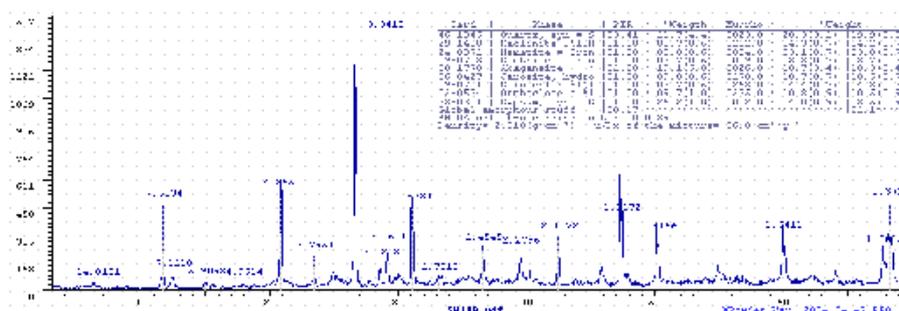
Ecotoxicidad	C3	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	100	
<i>L. sativum</i>	100	
<i>S. alba</i>	100	
<i>H. incongruens</i>	100	

C4 SEDIMENTO

	<p>Descripción macromorfológica</p> <p>Marrón amarillento oscuro (10YR 3/3) en húmedo y Marrón amarillento oscuro (10YR 4/6) en seco. Estructura débil en bloques subangulares finos. No adherente; No plástico; Suelto; Blando.</p>
---	---

C4	pH H₂O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)	CaCO₃ (%)	MO (%)
	3,3	3,1	377	4,0	<ld	<ld

Mineralogía (%)	Filo14	Filo7	Fsp	Qtz	Gp	Jar	Hem	Gt	Aka	Amorfo
C4	4	4	11	20	24	11	3	4	17	2



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
C4	Húmedo	0,5	1,2	2,1	2,4	21,0	24,5	25,4	22,8
	Seco	0,0	0,8	0,9	2,4	21,7	28,8	24,7	20,8

Elementos traza		Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Hg
		mg/kg	µg/kg						
	Total	24067	2338	54	106582	440	250	688	30
	MJ	2408	17	8,7	24770	69,9	13,8	69	<ld
	1:5	4261,4	12,69	23,67	5,2	0,003	6,2	213	<ld
	Ácida	4531	645	25,8	908	2,48	11,7	207	<ld
	Oxidante	3359	1992	14,5	93	0,01	9,8	84	<ld

FRX (%)	Na₂O	MgO	Al₂O₃	SiO₂	P₂O₅	SO₃	K₂O	CaO	TiO₂	MnO	Fe₂O₃	1000°C
C4	1	2	11	33	0,3	8	1	2	0,3	0,1	13	12,8

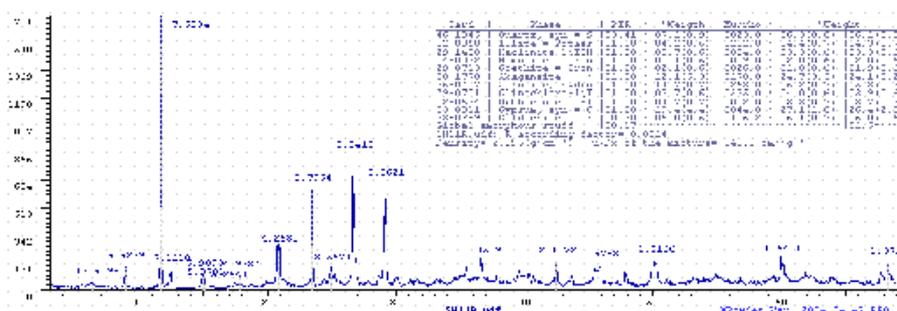
Ecotoxicidad	C4	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	100	
<i>L. sativum</i>	100	
<i>S. alba</i>	100	
<i>H. incongruens</i>	100	

C5 SEDIMENTO

	Descripción macromorfológica	Marrón amarillento (10YR 5/6) en húmedo y Amarillo (10YR 7/6) en seco. Estructura moderada prismática mediana. Adherente; Plástico; Firme; Muy duro.
---	-------------------------------------	--

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
C5	5,1	4,8	246	3,4	<ld	<ld

Mineralogía (%)	Filo14	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Gp	Jar	Hem	Aka	Gt	Gol	Amorfo
C5	4	4	3	4	6	26	16	2	24	2	6	3



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
C5	Húmedo	5,2	20,7	10,1	1,7	22,4	12,0	27,8	0,2
	Seco	6,2	19,7	9,1	0,7	24,4	12,1	27,8	0,2

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	9241	3750	43	84387	816	928	924	1967
	MJ	2993	73	14	34898	104	13,5	124	<ld
	1:5	974	4	10,5	5,1	0,003	0,2	168	<ld
	Ácida	6450	351	40,5	3500	5,8	42,5	600	<ld
Oxidante	3900	60	18,5	201	0,6	7,5	400	<ld	

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
C5	0,3	2	14	29	0,3	11	1	4	0,5	0,1	17	17,3

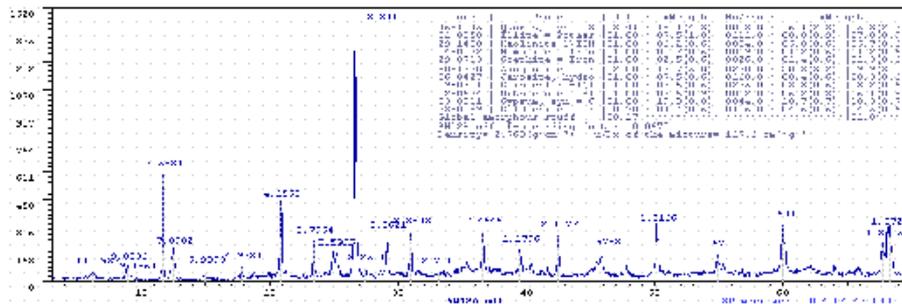
Ecotoxicidad	C5	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	0	14,11
<i>L. sativum</i>	60	79,05
<i>S. alba</i>	20	83,08
<i>H. incongruens</i>	100	

C6 SEDIMENTO

	Descripción macromorfológica	Marrón oliva (2,5Y 4/4) en húmedo y Marrón amarillento claro (2,5Y 6/4) en seco. Estructura débil granular fina. No adherente; No plástico; Firme; Duro.
---	-------------------------------------	--

	pH H₂O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)	CaCO₃ (%)	MO (%)
C6	6,5	6,2	180	1,7	<ld	<ld

Mineralogía (%)	Filo14	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Gp	Jar	Hem	Aka	Gol	Gt	Amorfo
C6	8	8	6	6	34	18	8	1	2	5	2	2



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
C6	Húmedo	0,9	4,0	2,6	4,3	23,1	26,7	24,6	13,7
	Seco	2,6	7,0	2,0	1,2	13,5	11,7	61,7	0,6

Elementos traza		Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Hg
		mg/kg	µg/kg						
	Total	6849	2891	23	45744	438	289	1174	76
	MJ	2094	48	5,6	19135	64,2	13,5	203	<ld
	1:5	110	43	1,6	63,6	0,099	0,6	8,5	<ld
Ácida	5305	663	20,5	1502	6	52	576	<ld	
Oxidante	1001	54	11	205	0,1	5	601	<ld	

FRX (%)	Na₂O	MgO	Al₂O₃	SiO₂	P₂O₅	SO₃	K₂O	CaO	TiO₂	MnO	Fe₂O₃	1000°C
C6	0,2	2	14	44	0,3	4	1	2	0,5	0,2	14	7,1

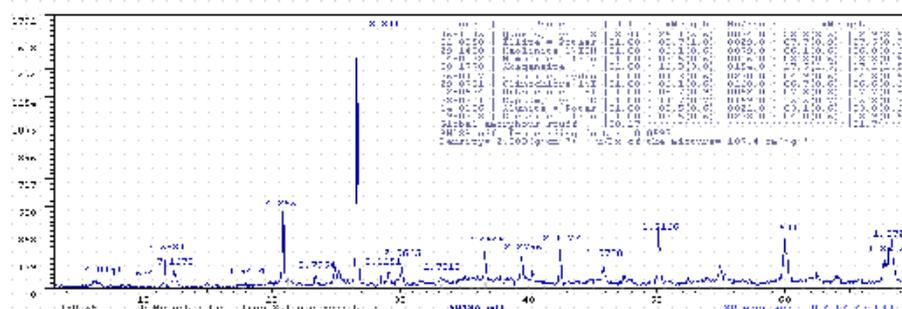
Ecotoxicidad	C6	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	10	22,91
<i>L. sativum</i>	0	41,12
<i>S. alba</i>	0	39,73
<i>H. incongruens</i>	61,66	

C7 SEDIMENTO

	<p align="center">Descripción macromorfológica</p>	<p>Gran variedad de colores comprendidos desde el rojo oscuro (10R 3/6) al amarillo (10YR 7/6) en húmedo y desde el marrón muy pálido (10YR 8/4) al rojo (10R 4/8) en seco. Sin estructura. No adherente; No plástico; Suelto; Suelto.</p>
---	---	--

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
C7	3,6	3,1	385	2,7	<ld	<ld

Mineralogía (%)	Filo14	Filo 10	Filo 7	Fsp	Qtz	Gp	Jar	Hem	Aka	Gt	Alu	Amorfo
C7	7	7	6	8	38	15	5	3	2	4	3	2



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
C7	Húmedo	0,1	0,1	0,4	0,6	6,8	14,4	26,1	51,5
	Seco	-	-	-	0,1	7,9	14,4	25,1	52,5

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	10397	2292	41	72776	407	147	2418	122
	MJ	1276	11	13	23284	68	12,5	56	<ld
	1:5	1317,4	9,9	9,1	1,6	0,02	5,3	77,3	<ld
	Ácida	1683	507	16,3	928	7,4	15,8	130	<ld
Oxidante	55	1634	20,8	96	0,2	16,8	990	<ld	

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
C7	1	2	15	47	0,4	6	1	1	0,4	0,1	15	10,4

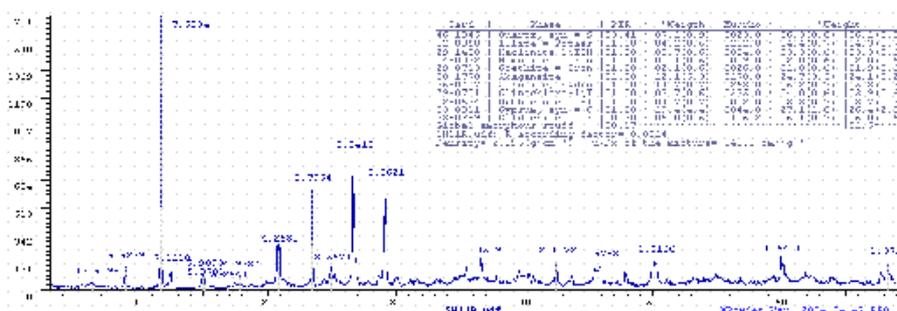
Ecotoxicidad	C7	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	30	35,72
<i>L. sativum</i>	10	34,50
<i>S. alba</i>	0	58,26
<i>H. incongruens</i>	100	

C8 SEDIMENTO

	Descripción macromorfológica	Marrón amarillento (10YR 5/6) en húmedo y Amarillo (10YR 7/6) en seco. Estructura moderada prismática mediana. Adherente; Plástico; Firme; Muy duro.
---	-------------------------------------	--

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
C8	4,9	4,6	246	3,4	<ld	<ld

Mineralogía (%)	Filo14	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Gp	Jar	Hem	Aka	Gt	Gol	Amorfo
C8	4	4	3	4	6	26	16	2	24	2	6	3



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
C8	Húmedo	5,1	20,8	10,2	1,6	22,4	12,0	27,8	0,2
	Seco	6,2	19,7	9,1	0,8	24,3	12,3	27,6	0,2

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	9251	3749	43	84387	816	928	924	1967
	MJ	2993	73	14	34898	104	13,5	124	<ld
	1:5	974	5	10,5	5,1	0,003	0,2	168	<ld
	Ácida	6450	351	39,5	3480	5,8	42,5	600	<ld
	Oxidante	3900	60	18,5	201	0,6	7,5	375	<ld

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
C8	0,3	2	14	29	0,3	11	1	4	0,5	0,1	17	17,3

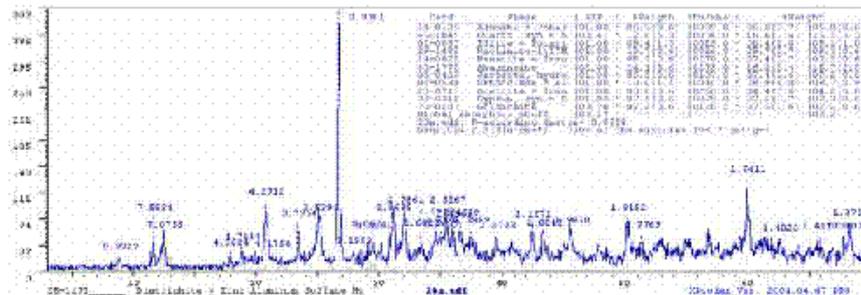
Ecotoxicidad	C8	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	0	15,11
<i>L. sativum</i>	60	69,90
<i>S. alba</i>	20	80,10
<i>H. incongruens</i>	100	

D1 SEDIMENTO

	Descripción macromorfológica	Marrón amarillento oscuro (10YR 4/4) en húmedo y Marrón amarillento (10YR 5/4) en seco. Sin estructura. Ligeramente adherente; Plástico; Friable; Ligeramente duro.
---	---	--

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
D1	2,5	2,4	157	4,5	<ld	<ld

Mineralogía (%)	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Gp	Jar	Hem	Aka	Gt	Alu	Gol	Amorfo
D1	8	10	9	23	7	7	7	8	4	6	8	3



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
D1	Humedo	2,2	17,8	7,9	7,3	21,7	18,1	19,3	5,6
	Seco	6,5	22,4	9,0	8,1	21,3	21,6	11,1	0,1

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	10437	2471	23	157767	1593	404	1553	114
	MJ	2283	53	10	58043	104	14,3	261	<ld
	1:5	38	1	2,37	<ld	<ld	0,1	29,6	<ld
	Ácida	4019	654	19,2	6402	8,2	43,9	794	<ld
	Oxidante	1355	143	5,6	<ld	6,7	5,6	280	<ld

FRX	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
D1	0,5	1	7	34	0,1	11	1	5	0,3	0,2	20	17,3

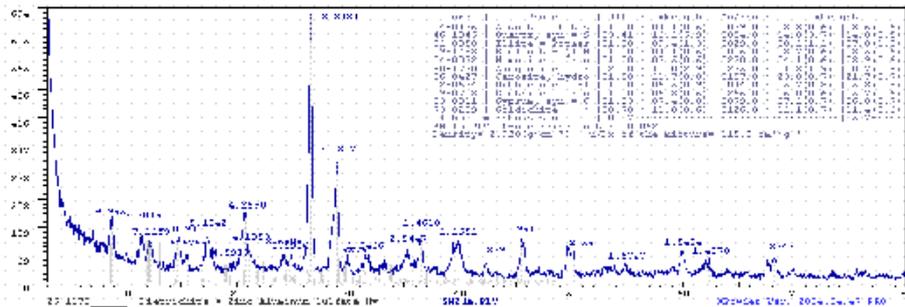
Ecotoxicidad	D1	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	0	50,48
<i>L. sativum</i>	90	10,01
<i>S. alba</i>	80	64,14
<i>H. incongruens</i>	100	

D2 SEDIMENTO

	Descripción macromorfológica	Marrón oliva claro (2,5Y 5/6) en húmedo y Amarillo (2,5Y 7/6) en seco. Estructura débil migajosa media. Adherente; Ligeramente plástico; Friable; Ligeramente duro.
---	-------------------------------------	---

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
D2	2,5	2,4	504	2,5	<ld	<ld

Mineralogía (%)	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Gp	Jar	Hem	Gt	Aka	Alu	Gol	Amorfo
D2	8	3	5	21	7	22	4	6	4	3	11	6



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
D2	Humedo	12,0	19,0	7,8	6,5	14,5	16,2	22,7	1,1
	Seco	7,6	10,2	2,3	2,0	11,9	5,3	40,2	20,5

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	2232	47619	37	214782	3939	636	496	<ld
	MJ	532	186	13,3	69545	151	11,5	61	<ld
	1:5	30	6,6	0,03	15,7	0,08	10,5	21	<ld
	Ácida	17	196	0,1	4114	18,2	22,3	26	<ld
Oxidante	6	55	0,05	31	9,2	3,2	6	<ld	

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
D2	0,3	0,5	6	13	0,1	15	1	1	0,2	0,1	26	19,5

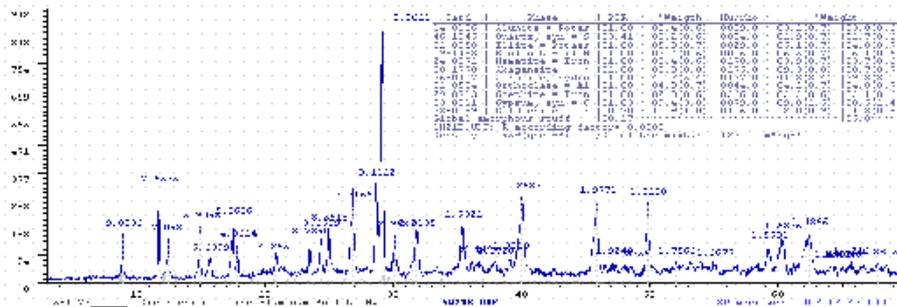
Ecotoxicidad	D2	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	100	
<i>L. sativum</i>	100	
<i>S. alba</i>	100	
<i>H. incongruens</i>	100	

D3 SEDIMENTO

	Descripción macromorfológica	Amarillo amarronado (10YR 6/8) en húmedo y Amarillo (10YR 8/6) en seco. Estructura débil migajosa media. Adherente; Ligeramente plástico; Firme; Duro.
---	-------------------------------------	--

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
D3	2,1	1,8	570	6,2	<ld	<ld

Mineralogía (%)	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Gp	Jar	Hem	Gt	Aka	Alu	GoI	Amorfo
D3	5	6	4	3	9	39	4	2	9	3	11	5



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
D3	Humedo	10,9	17,9	7,5	6,7	17,9	18,5	19,7	0,9
	Seco	1,5	5,6	3,5	3,6	12,3	8,8	23,2	41,6

Elementos traza		Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Hg
		mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	µg/kg
	Total	2430	12148	39	242954	3210	569	685	<ld
	MJ	600	128	6,9	114429	160	16	74	<ld
	1:5	818	135,1	7,2	1010,3	0,07	88,1	59,2	<ld
	Ácida	455	50	7,3	1136	0,2	82,3	455	<ld
Oxidante	489	53	2,7	330	1,1	33,2	364	<ld	

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
D3	0,3	0,5	6	13	0,1	15	1	1	0,2	0,1	26	32,5

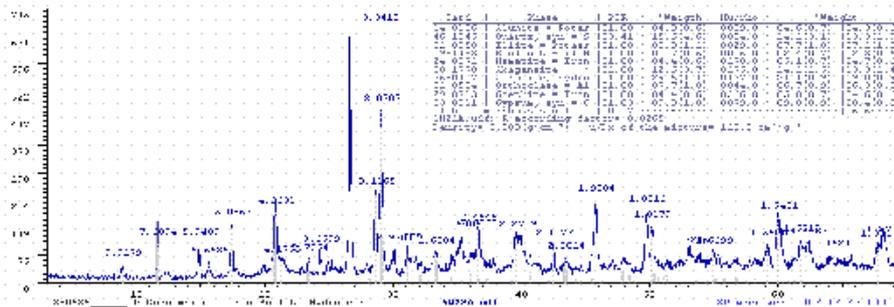
Ecotoxicidad	D3	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	100	
<i>L. sativum</i>	100	
<i>S. alba</i>	100	
<i>H. incongruens</i>	100	

D4 SEDIMENTO

	Descripción macromorfológica	Amarillo amarronado (10YR 6/8) en húmedo y Amarillo (2,5Y 7/6) en seco. Estructura débil granular media. Ligeramente adherente; Ligeramente plástico; Firme; Duro.
---	-------------------------------------	--

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
D4	2,1	2,2	545	6,2	<ld	<ld

Mineralogía (%)	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Gp	Jar	Hem	Gt	Aka	Alu	Amorfo
D4	7	2	6	22	8	29	5	5	5	4	7



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
D4	Húmedo	0,2	2,1	3,4	7,3	10,2	17,0	26,4	33,4
	Seco	2,0	4,7	2,2	1,1	8,9	6,5	30,1	44,7

Elementos traza		Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Hg
		mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	µg/kg
	Total	2163	3558	22	199519	3961	615	721	<ld
	MJ	647	93	7	80873	149	8,3	340	<ld
	1:5	586	1,2	6,1	27	0,06	66	549	<ld
	Ácida	525	52	10,3	8795	23,9	98,2	625	<ld
Oxidante	196	15	0,6	151	1	15,2	304	<ld	

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
D4	0,3	1	7	22	0,1	14	1	2	0,3	0,1	23	24,1

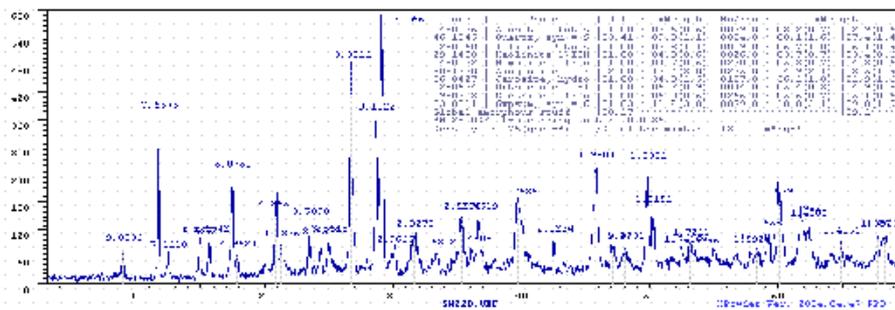
Ecotoxicidad	D4	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	100	
<i>L. sativum</i>	100	
<i>S. alba</i>	100	
<i>H. incongruens</i>	100	

D5 SEDIMENTO

	Descripción macromorfológica	Amarillo amarronado (10YR 6/8) en húmedo y Amarillo amarronado (10YR 6/6) en seco. Estructura débil granular media. Ligeramente adherente; Plástico; Firme; Muy duro.
---	-------------------------------------	---

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
D5	2,2	1,8	566	6,8	<ld	<ld

Mineralogía (%)	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Gp	Jar	Hem	Gt	Aka	Alu	Amorfo
D5	6	3	5	17	10	33	5	5	4	3	9



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
D5	Humedo	0,5	1,8	2,1	2,5	10,3	14,0	28,0	40,7
	Seco	0,4	1,9	2,1	2,5	10,3	13,6	26,4	42,7

Elementos traza		Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Hg
		mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	µg/kg
	Total	1722	3086	23	218504	2362	344	802	<ld
	MJ	644	99	6,1	102676	116,5	13,5	338	<ld
	1:5	827	78	6,1	2529	0,06	115,5	389	<ld
	Ácida	442	107	4	575	27,6	97,8	697	<ld
Oxidante	221	19	3,1	96	1,4	46,5	221	<ld	

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
D5	0,3	1	7	22	0,1	14	1	2	0,3	0,1	23	28,2

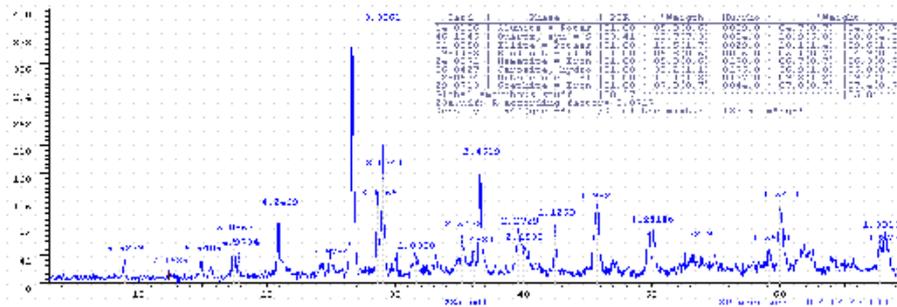
Ecotoxicidad	D5	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	100	
<i>L. sativum</i>	100	
<i>S. alba</i>	100	
<i>H. incongruens</i>	100	

D6 SEDIMENTO

	Descripción macromorfológica	Amarillo amarronado (10YR 6/8) en húmedo y Amarillo amarronado (10YR 6/8) en seco. Sin estructura. Ligeramente adherente; Plástico; Friable; Blando.
---	-------------------------------------	--

	pH H₂O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)	CaCO₃ (%)	MO (%)
D6	2,1	2,1	559	1,6	<ld	<ld

Mineralogía (%)	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Jar	Hem	Gt	Alu	Amorfo
D6	10	5	9	18	35	6	7	5	5



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
D6	Humedo	4,0	8,0	4,1	5,3	19,1	18,5	24,4	16,6
	Seco	4,5	10,4	4,5	5,4	5,5	12,3	57,1	0,3

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	12364	21884	22	233432	4429	310	495	528
	MJ	549	96	6,3	96716	221	8,3	46	<ld
	1:5	10	0,2	0,01	129,5	0,04	3,8	13	<ld
	Ácida	20	110	0,02	7649	23,4	10,4	16	<ld
	Oxidante	30	113	5,9	248	100,6	8,9	8	<ld

FRX (%)	Na₂O	MgO	Al₂O₃	SiO₂	P₂O₅	SO₃	K₂O	CaO	TiO₂	MnO	Fe₂O₃	1000°C
D6	0,3	0,3	5	33	0,1	10	1	0	0,3	0,1	31	17,1

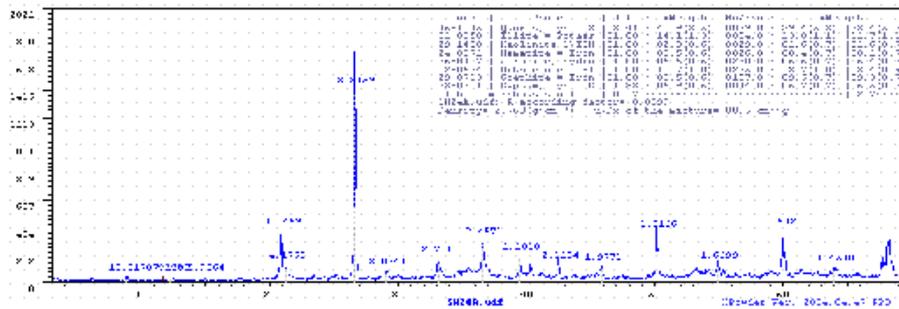
Ecotoxicidad	D6	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	100	
<i>L. sativum</i>	100	
<i>S. alba</i>	100	
<i>H. incongruens</i>	100	

D7 SEDIMENTO

	Descripción macromorfológica	Marrón oscuro (10YR 3/3) en húmedo y Marrón amarillento oscuro (10YR 4/6) en seco. Manchas de color amarillo amarronado (10YR 6/8) frecuentes, medianas, definidas y de límites difusos. Sin estructura. No adherente; No plástico; Friable; Blando.
---	-------------------------------------	--

	pH H₂O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)	CaCO₃ (%)	MO (%)
D7	5,8	5,0	269	1,3	<ld	<ld

Mineralogía (%)	Filo10	Filo7	Qtz	Fsp	Gp	Jar	Hem	Gt	Amorfo
D7	13	3	13	38	7	6	8	9	3



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
D7	Humedo	0,05	0,2	0,9	2,2	25,8	32,5	27,1	11,2
	Seco	-	1,0	0,6	2,2	22,4	22,8	27,1	23,9

Elementos traza		Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Hg
		mg/kg	µg/kg						
	Total	19366	3486	21	221831	1610	233	2264	<ld
	MJ	1756	16	9,7	45000	85	17,6	450	<ld
	1:5	31,2	2,6	1,2	0,7	0,01	0,3	21	<ld
Ácida	1119	2143	9,5	1964	8,6	13,8	500	<ld	
Oxidante	2976	1845	10	78	1,8	11	1581	<ld	

FRX (%)	Na₂O	MgO	Al₂O₃	SiO₂	P₂O₅	SO₃	K₂O	CaO	TiO₂	MnO	Fe₂O₃	1000°C
D7	0,2	2	11	38	0,1	5	1	1	0,4	0,3	30	10,4

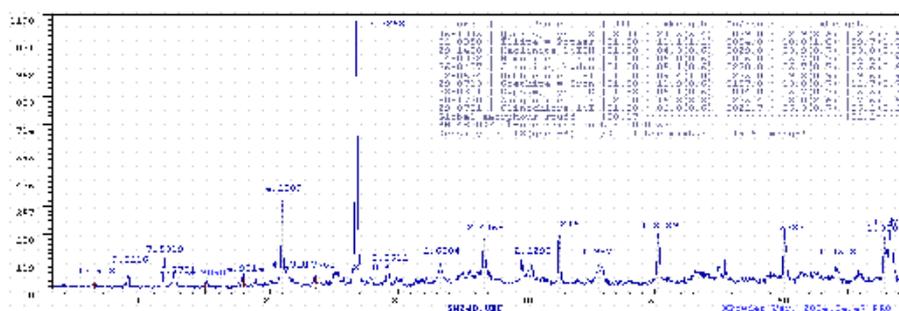
Ecotoxicidad	D7	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	100	
<i>L. sativum</i>	100	
<i>S. alba</i>	100	
<i>H. incongruens</i>	100	

D8 SEDIMENTO

	Descripción macromorfológica	Marrón amarillento oscuro (10YR 3/4) en húmedo y Marrón (10YR 4/3) en seco. Manchas de color amarillo amarronado (10YR 6/8) frecuentes, medianas, definidas y de límites difusos. Sin estructura. No adherente; Ligeramente plástico; Friable; Blando.
---	---	--

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
D8	4,1	3,9	318	1,8	<ld	<ld

Mineralogía (%)	Filo 14	Filo10	Filo7	Qtz	Fsp	Aka	Gp	Jar	Hem	Gt	Amorfo
D8	5	10	4	10	28	12	6	5	5	13	2



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
D8	Humedo	0,1	0,2	0,8	1,9	25,6	34,3	27,2	10,0
	Seco	0,5	3,0	1,9	4,1	31,8	28,5	21,8	8,6

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	9158	3571	22	184066	1448	165	1877	<ld
	MJ	2487	45	5,9	49749	73	22	678	<ld
	1:5	307	12,4	2,7	1,4	0,04	3,9	283	<ld
	Ácida	1174	181	10,9	25	1	11,3	707	<ld
	Oxidante	2674	1460	7,8	132	1,5	8,3	987	<ld

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
D8	0,2	2	11	38	0,1	5	1	1	0,4	0,3	30	9,1

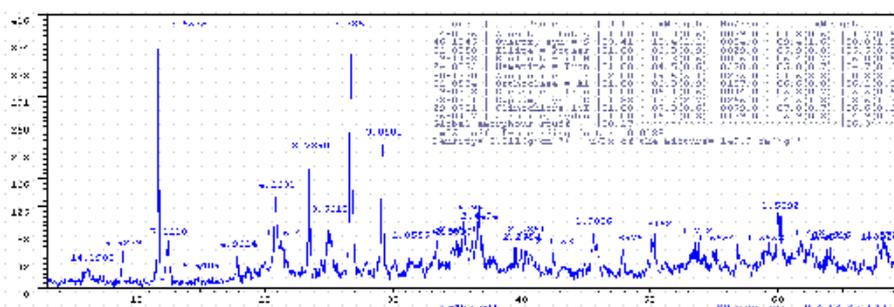
Ecotoxicidad	D8	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	100	
<i>L. sativum</i>	100	
<i>S. alba</i>	100	
<i>H. incongruens</i>	100	

D9 SEDIMENTO

	<p>Descripción macromorfológica</p> <p>Marrón amarillento oscuro (10YR 4/6) en húmedo y Amarillo amarronado (10YR 6/6) en seco.</p> <p>Estructura débil granular fina.</p> <p>Adherente; No plástico; Friable; Ligeramente duro.</p>
---	---

	pH H₂O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)	CaCO₃ (%)	MO (%)
D9	4,5	4,2	280	6,0	<ld	<ld

Mineralogía (%)	Filo14	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Gp	Jar	Hem	Aka	Gt	Alu	Amorfo
D9	7	5	6	6	22	14	15	5	7	5	2	6



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
D9	Humedo	2,5	32,5	9,6	6,2	17,9	16,4	13,2	1,7
	Seco	3,3	13,4	6,0	4,9	15,8	11,2	40,9	4,4

Elementos traza		Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Hg
		mg/kg	µg/kg						
	Total	10169	3428	55	213790	1493	207	3125	<ld
	MJ	1767	60	11,5	47045	140	12,6	279	<ld
	1:5	1039	1,9	7,6	1,6	0,03	0,4	173	<ld
	Ácida	1549	257	15,8	4683	3,5	8,1	405	<ld
	Oxidante	678	14	4,9	45	1,1	1,5	1162	<ld

FRX (%)	Na₂O	MgO	Al₂O₃	SiO₂	P₂O₅	SO₃	K₂O	CaO	TiO₂	MnO	Fe₂O₃	1000°C
D9	0,3	3	11	28	0,1	7	1	2	0,3	0,2	28	15,2

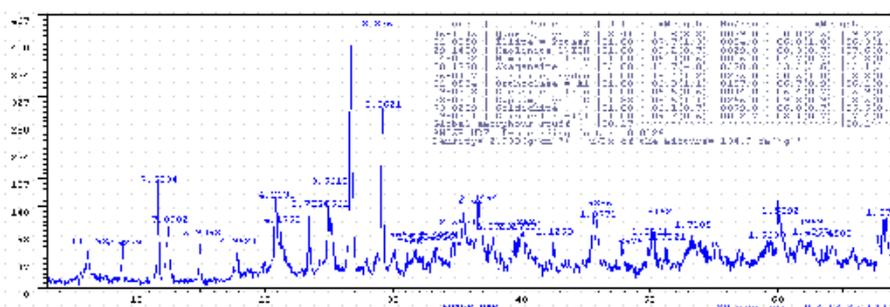
Ecotoxicidad	D9	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	100	
<i>L. sativum</i>	100	
<i>S. alba</i>	100	
<i>H. incongruens</i>	100	

D10 SEDIMENTO

	Descripción macromorfológica	Marrón amarillento (10YR 5/6) en húmedo y Amarillo amarronado (10YR 6/6) en seco. Estructura débil granular fina. Ligeramente adherente; Plástico; Friable; Duro.
---	-------------------------------------	---

	pH H₂O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)	CaCO₃ (%)	MO (%)
D10	4,5	4,1	334	4,7	<ld	<ld

Mineralogía (%)	Filo14	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Gp	Jar	Hem	Aka	Gt	Gol	Amorfo
D10	7	6	8	6	18	9	19	4	4	6	5	8



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
D10	Húmedo	2,0	25,9	7,6	4,7	14,2	15,1	19,1	11,3
	Seco	2,7	11,0	4,2	3,2	10,9	12,9	54,5	0,8

Elementos traza		Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Hg
		mg/kg	µg/kg						
	Total	4975	3438	75	227363	1260	149	2025	<ld
	MJ	2097	92	5,7	56359	166	6,1	524	<ld
	1:5	283	11	6,8	8,1	0,03	6,4	467	<ld
	Ácida	425	61	4,7	249	1,3	9,4	731	<ld
	Oxidante	618	15	2,4	69	0,2	1,9	792	<ld

FRX (%)	Na₂O	MgO	Al₂O₃	SiO₂	P₂O₅	SO₃	K₂O	CaO	TiO₂	MnO	Fe₂O₃	1000°C
D10	0,3	3	11	28	0,1	7	1	2	0,3	0,2	28	16,5

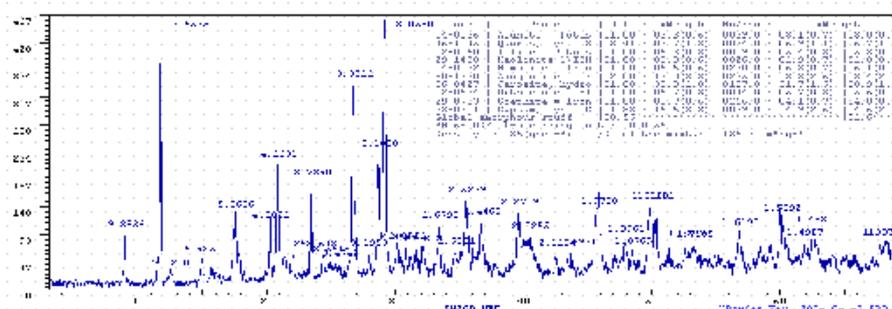
Ecotoxicidad	D10	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	100	
<i>L. sativum</i>	100	
<i>S. alba</i>	100	
<i>H. incongruens</i>	100	

D12 SEDIMENTO

	Descripción macromorfológica	Marrón amarillento oscuro (10YR 4/6) en húmedo y Amarillo amarronado (10YR 6/6) en seco. Sin estructura. Adherente; Ligeramente plástico; Friable; Duro.
---	-------------------------------------	--

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
D12	2,3	2,0	444	15,8	<ld	<ld

Mineralogía (%)	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Gp	Jar	Hem	Aka	Gt	Alu	Amorfo
D12	5	3	6	21	15	31	6	4	4	3	2



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
D12	Humedo	0,3	5,9	3,3	3,3	21,1	40,1	23,4	2,5
	Seco	3,0	1,1	1,0	2,0	10,9	8,1	73,4	0,5

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	11964	2039	25	277168	1866	1082	1645	<ld
	MJ	3614	114	6,8	102273	210,3	5,5	273	<ld
	1:5	997	19	4,3	5030	0,003	11,7	295,6	<ld
	Ácida	5612	13	15,3	1107	0,2	12,8	515	<ld
Oxidante	1429	24	3,6	2347	4,4	9,2	561	<ld	

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
D12	0,2	2	10	26	0,1	7	1	3	0,4	0,2	32	30,6

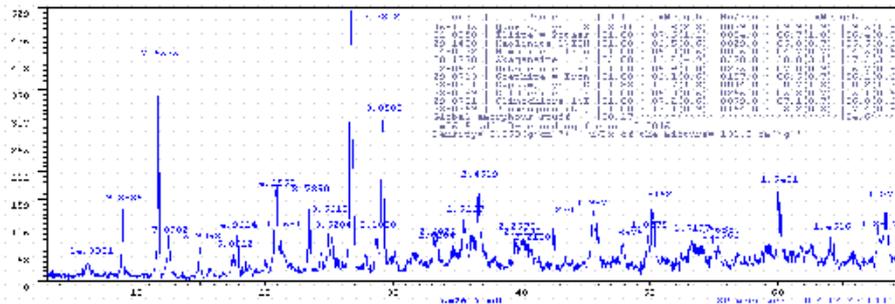
Ecotoxicidad	D12	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	100	
<i>L. sativum</i>	100	
<i>S. alba</i>	100	
<i>H. incongruens</i>	100	

D13 SEDIMENTO

	<p>Descripción macromorfológica</p> <p>Marrón amarillento (10YR 6/6) en húmedo y Amarillo amarronado (10YR 6/6) en seco. Estructura moderada en bloques fino subangulares medianos. Ligeramente adherente; Plástico; Friable; Duro.</p>
---	--

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
D13	3,0	2,7	422	5,3	<ld	<ld

Mineralogía (%)	Filo14	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Gp	Jar	Hem	Aka	Gt	Gol	Amorfo
D13	7	6	6	7	20	10	17	4	7	6	5	5



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
D13	Humedo	1,5	4,7	1,7	2,8	24,7	31,7	23,5	9,4
	Seco	2,3	7,1	3,6	4,8	21,1	22,8	38,0	0,5

Elementos traza		Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Hg
		mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	µg/kg
	Total	6856	6856	25	243879	1190	137	1714	<ld
	MJ	2005	151	6	53688	181	5,6	624	<ld
	1:5	1026	91	6,2	60	0,002	3,3	580	<ld
	Ácida	1127	47	7	217	0,2	3,4	686	<ld
Oxidante	441	1225	4	260	0,1	7,8	343	<ld	

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
D13	0,5	2	8	28	0,1	11	1	3	0,3	0,2	29	15,5

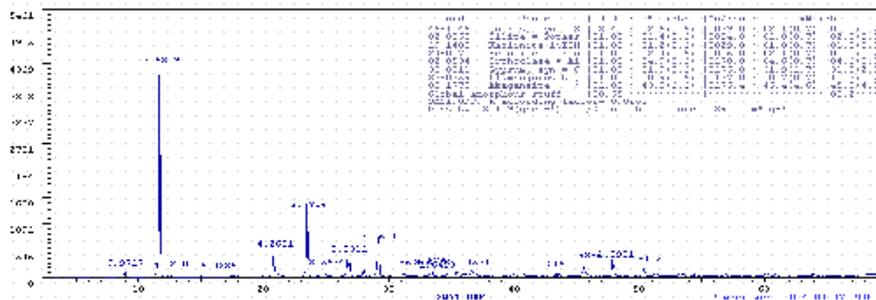
Ecotoxicidad	D13	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	100	
<i>L. sativum</i>	100	
<i>S. alba</i>	100	
<i>H. incongruens</i>	100	

D14 SUELO

	Descripción macromorfológica	Marrón amarillento oscuro (10YR 3/6) en húmedo y Marrón amarillento (10YR 5/6) en seco. Sin estructura. Ligeramente adherente; Ligeramente plástico; Friable; Blando.
---	-------------------------------------	---

	pH H₂O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)	CaCO₃ (%)	MO (%)
D14	4,2	4,1	257	2,5	<ld	1,0

Mineralogía (%)	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Gp	Jar	Hem	Aka
D14	2	1	5	34	32	11	2	13



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
D14	Humedo	1,9	6,7	5,1	7,0	23,9	21,7	22,8	10,8
	Seco	2,9	7,4	5,0	2,0	19,8	14,2	48,3	0,4

Elementos traza		Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Hg
		mg/kg	µg/kg						
Elementos traza	Total	2388	554	10	42980	3115	110	6686	651
	MJ	960	19	3,2	18043	71,9	18,1	2687	<ld
	1:5	12	8,7	1	2,9	0,007	0,02	73,7	<ld
	Ácida	60	40	1,8	43	0,3	9,0	86	<ld
	Oxidante	53	199	4,1	139	1,3	2,3	3243	<ld
	DTPA	43	48	0,1	66	0,05	2,2	211	<ld
D. viscosa	Raíz	258	121	4,6	1399	15	16	82	183
	Hojas	751	511	2,6	67818	86	20	343	1325

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
D14	0,3	0,4	5	15	0,1	20	1	11	0,2	1	27	18,1

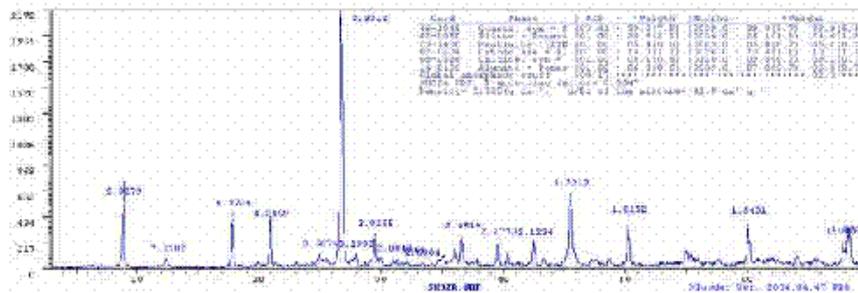
Ecotoxicidad	D14	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	10	0,06
<i>L. sativum</i>	10	14,70
<i>S. alba</i>	10	36,13
<i>H. incongruens</i>	100	

D15 SUELO

	<p>Descripción macromorfológica</p>	<p>Marrón oliva (2,5Y 4/4) en húmedo y Marrón oliva claro (2,5Y 5/4) en seco. (Muchas piedras). Sin estructura. No adherente; No plástico; Friable; Ligeramente duro.</p>

	pH H₂O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)	CaCO₃ (%)	MO (%)
D15	8,1	7,9	215	2,5	13,3	1,2

Mineralogía (%)	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Hem	Alu	Amorfo
D15	25	5	13	39	9	7	2



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
D15	Húmedo	0,6	8,6	4,4	4,2	11,4	14,7	28,2	27,9
	Seco	1,0	4,3	2,2	2,0	9,0	13,5	46,7	21,4

Elementos traza		Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Hg
		mg/kg	µg/kg						
	Total	1210	1936	11	73088	304	131	1447	658
	MJ	431	47	3,9	15632	2,9	14,2	646	<ld
	1:5	<ld	6,7	0,2	2,2	0,002	<ld	<ld	<ld
	Ácida	<ld	23	<ld	49	0,2	6,9	4	<ld
D. viscosa	Oxidante	183	48	3,2	37	2,0	12,4	321	<ld
	DTPA	29	75	0,3	20	0,1	6,4	35	<ld
	Raíz	226	519	3,2	1128	44,4	23,5	87	561
	Hojas	546	344	3,6	48269	38,4	46,3	436	244

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
D15	1	1	19	52	0,1	1	3	5	1	0,2	9	7,5

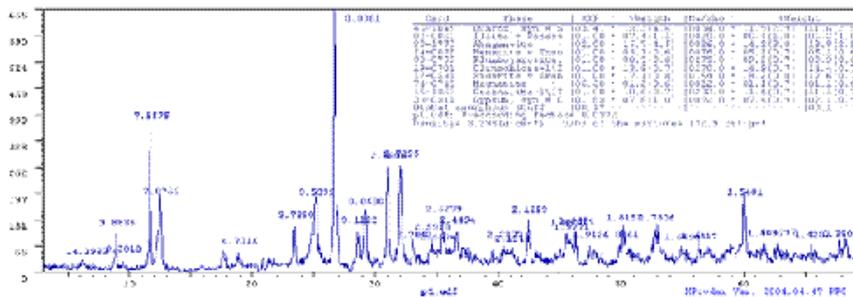
Ecotoxicidad	D15	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	30	74,63
<i>L. sativum</i>	0	1,06
<i>S. alba</i>	0	37,79
<i>H. incongruens</i>	10	42,42

E1 SUELO

	<p>Descripción macromorfológica</p>	<p>Gris muy oscuro (2,5Y 3/1) en húmedo y Marrón oliva claro (2,5Y 5/3) en seco. Sin estructura. No adherente; No plástico; Suelto; Suelto.</p>
---	--	---

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
E1	7,5	7,3	170	0,2	<ld	<ld

Mineralogía (%)	Filo14	Filo10	Filo7	Qtz	Gp	Jar	Hem	Aka	Mag	Sd	Amorfo
E1	14	6	11	15	7	9	5	8	3	18	3



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
E1	Húmedo	0,08	0,8	0,7	1,2	12,1	36,1	39,3	9,6
	Seco	0,4	1,1	0,6	0,7	7,7	11,7	24,2	53,6

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	6398	709	65	385922	554	68	8350	78
	MJ	975	103	11	11302	107	13	1026	<ld
	1:5	1	0,02	0,001	0,7	0,003	0,01	<ld	<ld
	Ácida	1838	619	11,5	5427	7	16	1603	<ld
	Oxidante	1795	179	6	37393	6	18,4	1838	<ld
<i>L. carthaginens</i>	DTPA	669	154	1,7	76	0,2	3,3	144	<ld
	Raíz	298	115,5	1	1299	5,8	6,2	38,5	467,4
	Hojas	411	137	1,4	953	22,4	13,4	181	27,2

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
E1	1	3	6	25	0,1	8	1	3	0,2	1	34	13,4

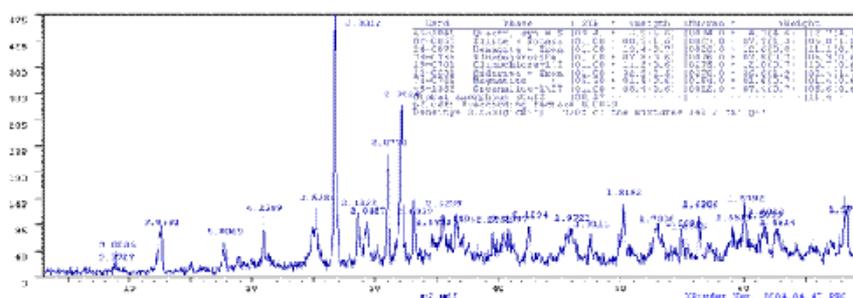
Ecotoxicidad	E1	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	5	17,06
<i>L. sativum</i>	7	23,79
<i>S. alba</i>	10	26,35
<i>H. incongruens</i>	53	

E2 SUELO

	Descripción macromorfológica	Marrón amarillento oscuro (10YR 3/4) en húmedo y Marrón amarillento claro (10YR 6/4) en seco. Sin estructura. No adherente; No plástico; Suelto; Suelto.
---	-------------------------------------	--

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
E2	7,4	7,2	126	3,5	<ld	<ld

Mineralogía (%)	Filo14	Filo10	Filo7	Qtz	Gp	Jar	Hem	Mag	Sd	Amorfo
E2	9	5	6	9	4	6	9	2	40	10



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
E2	Húmedo	0,4	2,2	0,8	1,1	9,7	40,8	37,8	7,2
	Seco	1,0	4,8	2,3	1,5	10,7	36,6	27,7	15,6

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	6600	1003	74	505894	868	147	10806	11
	MJ	1376	276	9	11303	79	19,6	714	<ld
	1:5	1,4	0,04	0,002	<ld	0,005	0,02	5,6	<ld
	Ácida	2793	901	8	8378	10,6	19,8	923	<ld
	Oxidante	1441	9	2,7	15631	23,4	8,1	1036	<ld
DTPA	566	230	1,6	104	0,2	9,1	206	<ld	
<i>A. macrostachyum</i>	Raíz	10012	1090	173	16784	147	103	545	342
	Hojas	2181	960	4,5	24236	114	27	2593	84

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
E2	1	4	8	27	0,2	7	1	1	0,2	1	38	19,2

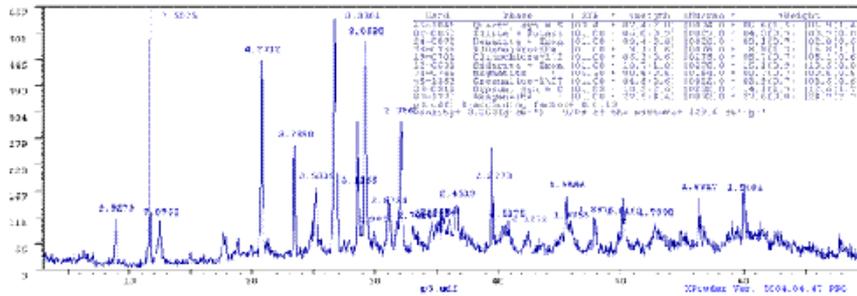
Ecotoxicidad	E2	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	5	20,76
<i>L. sativum</i>	10	11,75
<i>S. alba</i>	8	17,33
<i>H. incongruens</i>	21,6	56,11

E3 SEDIMENTO

	Descripción macromorfológica	Marrón amarillento oscuro (10YR 3/4) en húmedo y Marrón (10YR 5/3) en seco. Sin estructura. No adherente; No plástico; Suelto; Suelto.
---	-------------------------------------	--

	pH H₂O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)	CaCO₃ (%)	MO (%)
E3	7,5	7,2	126	3,7	<ld	<ld

Mineralogía (%)	Filo14	Filo10	Filo7	Qtz	Gp	Jar	Hem	Aka	Mag	Sd	Amorfo
E3	5	4	4	17	13	17	3	10	5	14	10



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
E3	Húmedo	0,09	1,7	0,7	0,8	12,1	45,2	33	6,4
	Seco	0,5	2,8	2,2	2	18,1	42,4	28,4	3,8

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	9830	2231	90	254491	2365	135	9381	549
	MJ	1460	203	8,1	14694	53	13,8	670	<ld
	1:5	2	0,01	0,001	1,1	0,01	0,01	5,8	<ld
	Ácida	4806	1636	26,6	15951	14,3	28,6	4141	<ld
	Oxidante	1125	15	4,1	9867	23,6	8,2	1380	<ld
	DTPA	140	202	3,5	56	0,3	9,2	252	<ld

FRX (%)	Na₂O	MgO	Al₂O₃	SiO₂	P₂O₅	SO₃	K₂O	CaO	TiO₂	MnO	Fe₂O₃	1000°C
E3	1	3	6	25	0,1	8	1	3	0,2	1	34	19,0

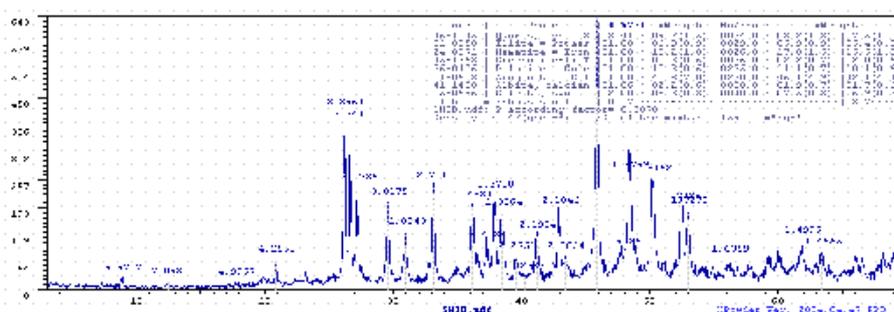
Ecotoxicidad	E3	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	10	43,90
<i>L. sativum</i>	100	
<i>S. alba</i>	60	89,59
<i>H. incongruens</i>	28,33	38,69

E4 SEDIMENTO

	<p align="center">Descripción macromorfológica</p>	<p>Marrón (7,5YR 4/3) en húmedo y Marrón claro (7,5YR 6/3) en seco.</p>
		<p>Presenta manchas de color marrón claro (7,5YR 6/3) frecuentes, pequeñas y medianas con límites difusos.</p> <p>Sin estructura.</p> <p>No adherente; No plástico; Friable; Ligeramente duro.</p>

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
E4	8,5	7,9	148	2,5	43,0	<ld

Mineralogía (%)	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Hem	Cal	Dol	Arg	Amorfo
E4	6	2	2	8	16	8	9	41	8



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
E4	Húmedo	0,07	7,5	5,2	9,3	29,6	19,1	17,5	11,6
	Seco	1,1	6,4	4,8	8,7	24,2	10,7	20,3	23,9

Elementos traza		Zn	Pb	Cd	Fe	As	Cu	Mn	Hg
		mg/kg	µg/kg						
	Total	2000	25	33	12750	22	13	1550	5021
	MJ	294	11	10,4	4101	5,2	3,3	333	<ld
	1:5	<ld	0,1	0,001	1,3	0,02	0,95	4,3	<ld
	Ácida	308	5	<ld	7	0,02	4,8	409	<ld
Oxidante	57	17	1,9	7	0,4	0,8	121	<ld	

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
E4	1	2	7	26	0,1	1	0,5	1	46	0,3	0,5	4	37,3

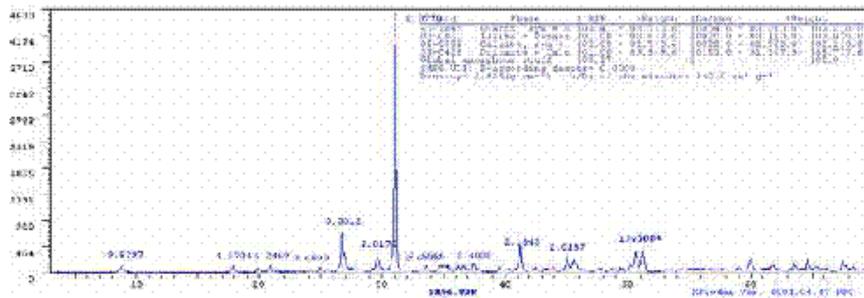
Ecotoxicidad	E4	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	0	10,89
<i>L. sativum</i>	10	0,86
<i>S. alba</i>	0	0,77
<i>H. incongruens</i>	0	0

E5 SUELO

	<p>Descripción macromorfológica</p>	<p>Marrón amarillento (10YR 5/6) en húmedo y Marrón amarillento claro (10YR 6/4) en seco. Sin estructura. No adherente; No plástico; Firme; Duro.</p>

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
E5	7,5	7,0	206	0,2	1,2	<ld

Mineralogía (%)	Filo10	Qtz	Cal	Dol	Amorfo
E5	3	3	2	89	3



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
E5	Húmedo	0,3	5,3	3,2	5,5	24,1	20,2	22,7	18,8
	Seco	2,5	8,6	3,5	5,1	20,3	15,6	37	7,5

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	135	63	6	161116	40	171	864	114
	MJ	32	22	2	10712	2,5	11	796	<ld
	1:5	<ld	3	0,3	1,7	0,002	0,02	<ld	<ld
	Ácida	<ld	6	<ld	67	<ld	2,1	2	<ld
	Oxidante	3	9	2,0	19	1,6	56	278	<ld
<i>D. viscosa</i>	DTPA	2	6	0,2	8	0,02	0,3	11	<ld
	Raíz	37	56	3,6	1003	<ld	4,7	54	390
	Hojas	146	93	0,6	24510	0,7	6,4	264	150

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
E5	0,1	7	13	30	0,1	0,2	4	15	0,5	0,1	4	26,4

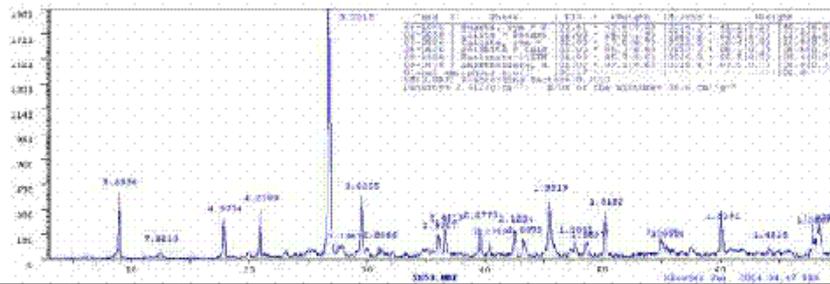
Ecotoxicidad	E5	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	0	0
<i>L. sativum</i>	20	0
<i>S. alba</i>	0	12,82
<i>H. incongruens</i>	10	22,95

E6 SUELO

	Descripción macromorfológica	Marrón amarillento (10YR 5/4) en húmedo y Marrón muy claro (10YR 7/3) en seco. Estructura migajosa moderada.. Ligeramente adherente; Ligeramente plástico; Firme; Ligeramente duro.
---	-------------------------------------	---

	pH H₂O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)	CaCO₃ (%)	MO (%)
E6	7,9	7,7	228	0,4	28,7	0,5

Mineralogía (%)	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Cal	Dol	Amorfo
E6	23	5	7	40	16	6	3



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
E6	Húmedo	1,0	5,0	3,9	4,0	17,7	21,5	33,1	13,8
	Seco	1,1	5,4	4,2	4,4	18,0	20,8	32,4	13,7

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	1494	538	12	46315	327	129	1584	839
	MJ	315	92	2,3	14341	3,3	37,4	694	<ld
	1:5	<ld	1,9	0,6	1,3	0,008	0,2	<ld	<ld
	Ácida	<ld	19	3,9	128	0,02	3,9	2	<ld
	Oxidante	43	7	3,9	44	4,3	15,4	99	<ld
Z. fabago	DTPA	118	41	0,8	45	0,08	7,8	41	<ld
	Raíz	552	50	2,1	150	<ld	<ld	37	97
	Hojas	699	65	2,9	200	<ld	5,7	45	135

FRX (%)	Na₂O	MgO	Al₂O₃	SiO₂	P₂O₅	SO₃	K₂O	CaO	TiO₂	MnO	Fe₂O₃	1000°C
E6	0,5	1	16	47	0,2	1	3	9	1	0,2	9	11,5

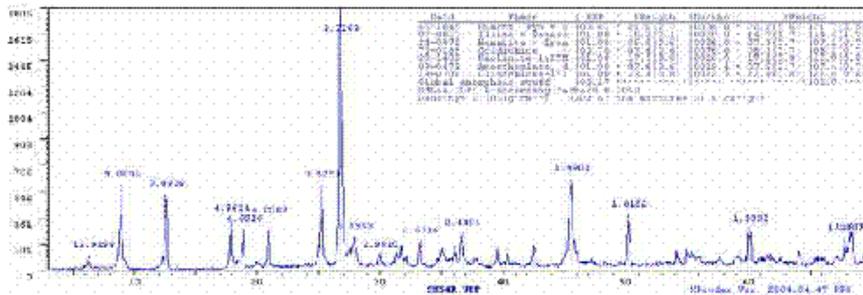
Ecotoxicidad	E6	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
S. saccharatum	10	7,91
L. sativum	20	0
S. alba	0	3,76
H. incongruens	26,6	29,77

E7 SUELO

	Descripción macromorfológica	Gris muy oscuro (10YR 3/1) en húmedo y Gris (10YR 5/1) en seco. Sin estructura. No adherente; No plástico; Suelto; Blando.
---	-------------------------------------	--

E7	pH H₂O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)	CaCO₃ (%)	MO (%)
	7,7	7,4	206	0,7	<ld	1,3

Mineralogía (%)	Filo14	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Hem	Gol	Amorfo
E7	22	14	17	8	22	7	8	2



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
E7	Húmedo	0,002	3,3	2,7	3,1	18,3	28,9	31,3	12,5
	Seco	0,9	7,5	6,9	6,8	19,8	22,9	27,4	7,9

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	3670	2041	14	118349	563	119	1528	402
	MJ	400	44	4,8	10760	3,4	18	600	<ld
	1:5	0,2	4,2	0,3	<ld	0,002	0,01	0,9	<ld
	Ácida	<ld	9	0,0	38	0,04	<ld	5	<ld
	Oxidante	214	79	4,3	19	2,1	9,4	427	<ld
D. viscosa	DTPA	80	185	0,6	19	1,2	5,5	70	<ld
	Raíz	239	249	2,8	992	5,2	27	76,5	61
	Hojas	237	206	2,6	42393	6,8	43,6	128	10,3

FRX (%)	Na₂O	MgO	Al₂O₃	SiO₂	P₂O₅	SO₃	K₂O	CaO	TiO₂	MnO	Fe₂O₃	1000°C
E7	1	3	22	46	0,1	1	4	1	1	0,2	14	6,6

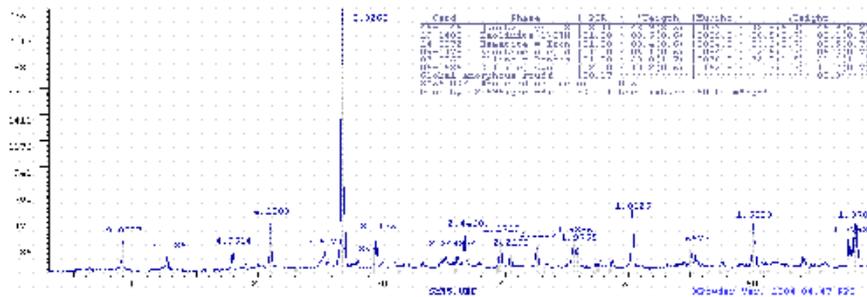
Ecotoxicidad	E7	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	20	38,08
<i>L. sativum</i>	40	14,84
<i>S. alba</i>	20	9,77
<i>H. incongruens</i>	5	40,08

E8 SUELO

	Descripción macromorfológica	Marrón amarillento oscuro (10YR 4/4) en húmedo y Marrón claro (10YR 6/3) en seco. Estructura migajosa moderada. Ligeramente adherente; Ligeramente plástico; Friable; Blando.
---	-------------------------------------	---

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
E8	7,5	7,3	214	0,5	4,9	0,7

Mineralogía (%)	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Hem	Cal	Amorfo
E8	21	8	5	47	4	11	4



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
E8	Húmedo	0,09	5,2	3,1	4,7	18,3	21,2	26,9	20,5
	Seco	0,3	1,6	1,8	2,8	17,0	22,8	39,5	14,4

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	3049	3002	14	189962	664	150	1735	173
	MJ	828	134	4,1	14508	7,2	22,1	648	<ld
	1:5	0,3	4,3	0,4	1,2	0,07	0,1	0,5	<ld
	Ácida	7	7	2,0	94	0,28	12,7	3	<ld
	Oxidante	57	68	1,7	167	1,7	2,3	104	<ld
L. carthaginens	DTPA	42	269	0,6	113	0,03	2,8	75	<ld
	Raíz	287	40,3	0,95	301	0,2	4,8	24	65
	Hojas	324	60,5	1,1	349	0,4	6	31	147

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
E8	0,5	2	14	46	1	1	2	5	1	0,2	13	13,1

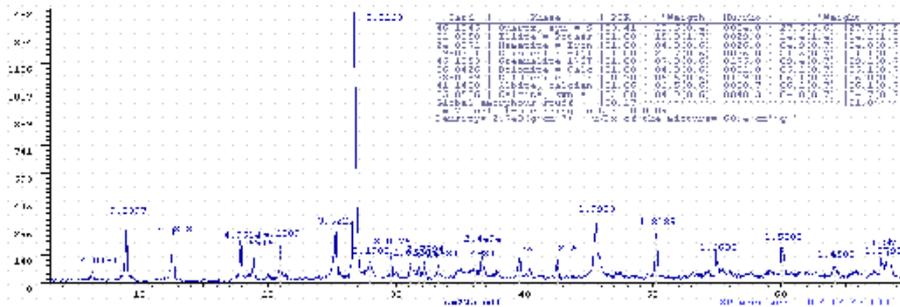
Ecotoxicidad	E8	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	10	60,10
<i>L. sativum</i>	10	58,40
<i>S. alba</i>	0	57,96
<i>H. incongruens</i>	18,33	0

E9 SEDIMENTO

	<p>Descripción macromorfológica</p> <p>Gris muy oscuro (10YR 3/1) en húmedo y Gris (10YR 5/1) en seco, Manchas de color Marrón claro (7,5YR 6/3) frecuentes, medianas, definidas y con límites difusos. Sin estructura. No adherente; No plástico; Suelto; Suelto.</p>
---	---

	pH H₂O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)	CaCO₃ (%)	MO (%)
E9	7,7	7,1	244	0,2	<ld	<ld

Mineralogía (%)	Filo14	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Hem	Cal	Dol	Gol	Amorfo
E9	21	14	9	6	27	5	5	5	6	2



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
E9	Húmedo	0,1	3,2	2,0	2,9	12,9	19,0	36,8	23,1
	Seco	0,4	2,5	1,4	2,1	6,1	11,0	44,0	33,0

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	8293	4688	26	159512	1062	429	3024	<ld
	MJ	350	16	9,5	4815	29,2	12	333	<ld
	1:5	<ld	0,01	<ld	<ld	0,001	0,9	<ld	<ld
	Ácida	1071	1905	15,5	1131	4,3	27	238	<ld
	Oxidante	635	278	4	48	1,8	15	595	<ld

FRX (%)	Na₂O	MgO	Al₂O₃	SiO₂	P₂O₅	SO₃	K₂O	CaO	TiO₂	MnO	Fe₂O₃	1000°C
E9	1	3	18	49	0,1	1	3	1	1	0,3	16	6,4

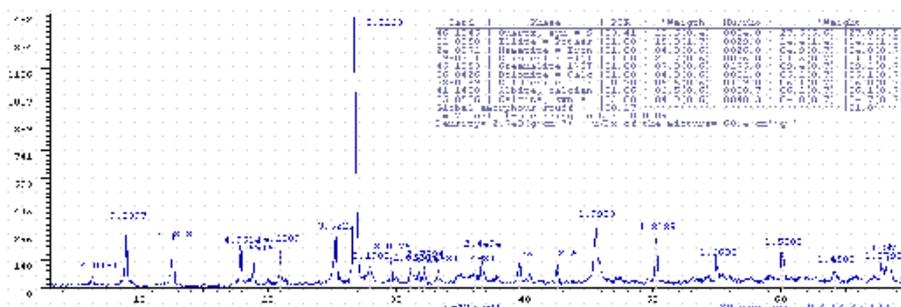
Ecotoxicidad	E9	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	0	14,39
<i>L. sativum</i>	0	0
<i>S. alba</i>	10	9,97
<i>H. incongruens</i>	11,7	18,55

E10 SEDIMENTO

	Descripción macromorfológica	Gris oscuro (10YR 4/1) en húmedo y Gris (10YR 6/1) en seco, Manchas de color Marrón claro (7,5YR 6/3) frecuentes, Medianas, definidas y con límites difusos. Sin estructura. No adherente; No plástico; Suelto; Suelto.
---	-------------------------------------	---

	pH H₂O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)	CaCO₃ (%)	MO (%)
E10	8,3	7,7	228	0,2	1,3	<ld

Mineralogía (%)	Filo14	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Hem	Gol	Amorfo
E10	17	15	12	8	33	6	7	2

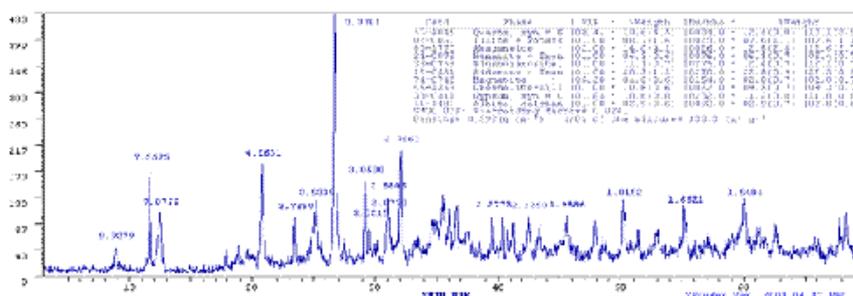


E11 SEDIMENTO

	<p align="center">Descripción macromorfológica</p>	<p>Marrón oliva oscuro (2,5Y 3/3) en húmedo y Marrón oliva (2,5Y 4/4) en seco. Sin estructura. Adherente; Ligeramente plástico; Friable; Blando.</p>
---	---	--

	pH H₂O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)	CaCO₃ (%)	MO (%)
E11	8,2	8,1	115	11,7	<ld	<ld

Mineralogía (%)	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Gp	Jar	Hem	Aka	Mag	Sd	Amorfo
E11	7	9	3	12	11	12	6	12	3	22	2



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
		Húmedo	3,0	13,6	7,1	9,4	28,0	16,7	22,1
E11	Seco	3,2	13,8	6,9	9,6	29,8	15,9	21,1	0,1

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	5404	2098	68	211295	720	166	7059	<ld
	MJ	1806	26	11	12829	12	21	395	<ld
	1:5	0,7	1	1	<ld	0,005	<ld	19	<ld
	Ácida	2188	273	27	15469	24,6	32	2656	<ld
Oxidante	86	25	3,5	156	0,9	57,4	625	<ld	

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
E11	2	5	8	28	0,1	9	1	5	0,3	1	23	15,5

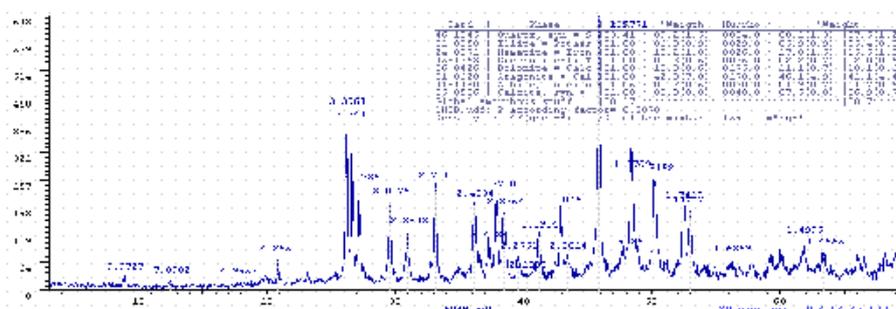
Ecotoxicidad	E11	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	10	24,45
<i>L. sativum</i>	20	36,24
<i>S. alba</i>	10	41,21
<i>H. incongruens</i>	100	

E12 SEDIMENTO

	Descripción macromorfológica	Marrón (7,5YR 4/3) en húmedo y Marrón claro (7,5YR 6/3) en seco. Presenta manchas de color marrón claro (7,5YR 6/3) frecuentes, pequeñas y medianas con límites difusos. Sin estructura. No adherente; No plástico; Friable; Ligeramente duro.
---	---	---

	pH H ₂ O	pH KCl	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	MO (%)
E12	8,5	7,9	148	2,5	43,0	<ld

Mineralogía (%)	Filo10	Filo7	Fsp	Qtz	Hem	Cal	Dol	Arg	Amorfo
E12	5	2	2	8	15	7	10	42	9



Granul.	%	<2µm	2-20µm	20-50µm	50-100µm	100-250µm	250-500µm	500-1000µm	1000-2000µm
E12	Húmedo	0,07	7,5	5,2	9,3	29,6	19,1	17,5	11,6
	Seco	1,1	6,4	4,8	8,7	24,2	10,7	20,3	23,9

Elementos traza		Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg	As mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Hg µg/kg
	Total	2005	20	33	12749	20	10	1450	5020
	MJ	294	11	10,4	4101	5,2	3,3	333	<ld
	1:5	<ld	0,1	0,001	1,3	0,02	0,95	4,3	<ld
	Ácida	308	25	<ld	7	0,02	4,8	409	<ld
	Oxidante	57	17	1,9	7	0,4	0,8	121	<ld

FRX (%)	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	1000°C
E12	1	2	7	26	0,1	1	1	46	0,3	0,5	4	37,3

Ecotoxicidad	E12	
	Mortalidad (%)	Inhibición (%)
<i>S. saccharatum</i>	0	10,89
<i>L. sativum</i>	10	0,86
<i>S. alba</i>	0	0,77
<i>H. incongruens</i>	0	0

A2 AGUA

	pH	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)
A2	7,2	174	1,1

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
A2	30	<ld	0,8	<ld	<ld	<ld	<ld	11,5	0,2

Iones	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₂ ⁻ (mg/l)	Br ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	CO ₃ ²⁻ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)
A2	96,3	0,1	0,8	6,5	378	593	53,4	24,7	134	50,3

MINTEQ		
A2		
Mineral	Log IAP	Sat. Index
Hidrocincita	13,761	5,061
Smithsonita	-9,047	1,853
ZnCO ₃	-9,047	1,753
Rodocrosita	-9,348	1,652
ZnCO ₃ ·1H ₂ O	-9,047	1,213
MnCO ₃ (am)	-9,348	1,152
Otavita	-10,88	1,13
Dolomita	-16,394	0,696
Calcita	-8,102	0,378
Aragonito	-8,102	0,234
Diásporo	6,873	0,211
Vaterita	-8,102	-0,189

Ecotoxicidad	A2
Microtox	No tóxico

A5 AGUA

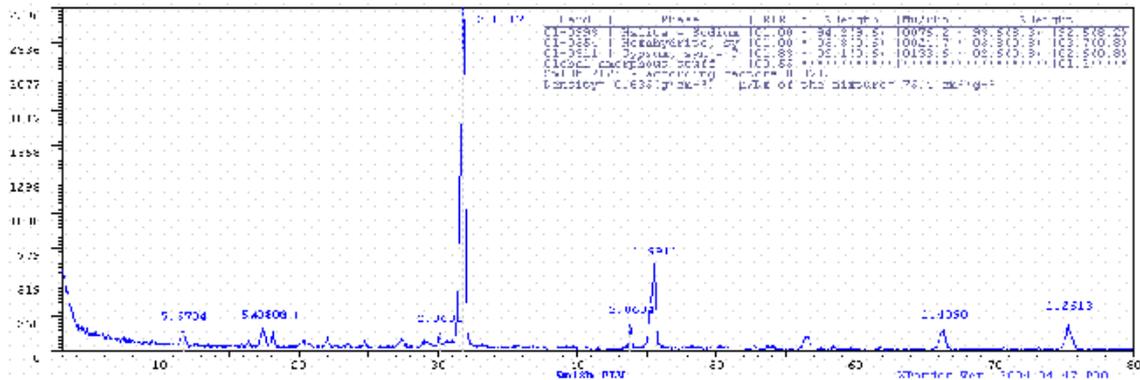
	pH	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)
A5	7,7	210	42,4

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
A5	70	1,3	1,2	<ld	<ld	<ld	<ld	3,4	0,5

Iones	F ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₂ ⁻ (mg/l)	Br ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	CO ₃ ²⁻ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)
A5	1,4	20236	11,7	94,5	5,5	10629	2400	14590	263	1192	2347

MINTEQ		
A5		
Mineral	Log IAP	Sat. Index
Hidrocincita	13,164	4,464
Smithsonita	-9,458	1,442
ZnCO ₃	-9,458	1,342
Rodocrosita	-9,771	1,229
ZnCO ₃ ·1H ₂ O	-9,458	0,802
MnCO ₃ (am)	-9,771	0,729
Otavita	-11,315	0,695

Ecotoxicidad	A5
Microtox	No tóxico



A6 AGUA

	pH	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)
A6	7,3	302	1,6

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
A6	0,02	1,2	0,002	0,04	3,3	<ld	<ld	<ld	0,2

Iones	F ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	Br ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	CO ₃ ²⁻ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)
A6	0,4	376	1,9	86	233	169	199	12,6	190	49

MINTEQ		
A6		
Mineral	Log IAP	Sat. Index
Hidrocerusita	-15,749	3,011
Cerusita	-12,044	1,156
Pb(OH) ₂	8,339	0,189
Calcita	-8,48	0,7
Diásporo	6,873	0,6
Hematites	-1,418	0,5

Ecotoxicidad	A6
Microtox	No tóxico

A7 AGUA

	pH	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)
A7	7,1	144	0,7

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
A7	0,1	0,005	<ld	0,5	<ld	<ld	<ld	<ld	<ld

Iones	F ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	Br ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	CO ₃ ²⁻ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)
A7	0,3	89	0,7	5,8	181,5	123	55,5	25	120	18

MINTEQ		
A7		
Mineral	Log IAP	Sat. Index
Diásporo	6,873	0,99
Hematites	-1,418	0,97

Ecotoxicidad	A7
Microtox	No tóxico

A8 AGUA

	pH	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)
A8	8,7	225	15,01

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
A8	0,04	<ld	0,3	0,1	7,9	<ld	<ld	<ld	0,2

Iones	F ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₂ ⁻ (mg/l)	Br ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	CO ₃ ²⁻ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)
A8	1,3	4189	1,8	22	6	3697	796	4187	128	118	379

MINTEQ		
A8		
Mineral	Log IAP	Sat. Index
Diásporo	6,873	0,92
Dolomita	-17,09	0,87
Hematites	-1,418	0,77
Magnesita	-7,46	0,23
Otavita	-12,01	0,05

Ecotoxicidad	A8
Microtox	No tóxico

A9 AGUA

	pH	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)
A9	3,3	383	22,8

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
A9	4000	3	3,5	9,2	7,6	<ld	9,7	2040	<ld

Iones	F ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	Br ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)
A9	19	248	48	32,4	41326	7527	423	446	4716

MINTEQ		
A9		
Mineral	Log IAP	Sat. Index
Anglesita	-7,79	0,9
Fe(OH) ₂ .7Cl ₂	-3,04	0,7
Yeso	-4,61	0,5

Ecotoxicidad	A9
Microtox	1,7

A10 AGUA

	pH	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)
A10	8,4	228	16,1

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
A10	0,07	<ld	0,7	0,2	2,2	<ld	<ld	<ld	0,4

Iones	F⁻ (mg/l)	Cl⁻ (mg/l)	NO₂⁻ (mg/l)	Br⁻ (mg/l)	NO₃⁻ (mg/l)	SO₄²⁻ (mg/l)	CO₃²⁻ (mg/l)	Na⁺ (mg/l)	K⁺ (mg/l)	Ca²⁺ (mg/l)	Mg²⁺ (mg/l)
A10	0,4	7015	0,9	29	90,3	2573	1051	4304	63,7	420	700

MINTEQ		
A10		
Mineral	Log IAP	Sat. Index
Diásporo	6,873	2,9
Dolomita	-17,09	1,3
Hematites	-1,418	1,1

Ecotoxicidad	A10
Microtox	No tóxico

A12 AGUA

	pH	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)
A12	8,5	251	7,5

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
A12	0,8	<ld	0,03	0,03	2,6	<ld	<ld	<ld	0,2

Iones	F⁻ (mg/l)	Cl⁻ (mg/l)	NO₂⁻ (mg/l)	Br⁻ (mg/l)	NO₃⁻ (mg/l)	SO₄²⁻ (mg/l)	CO₃²⁻ (mg/l)	Na⁺ (mg/l)	K⁺ (mg/l)	Ca²⁺ (mg/l)	Mg²⁺ (mg/l)
A12	0,3	4356	2	12	291	2000	101	2500	17,46	384,91	88,68

MINTEQ		
A12		
Mineral	Log IAP	Sat. Index
Hidrocincita	12,384	3,684
Dolomita	-15,418	1,672
Calcita	-7,503	0,977
Aragonito	-7,503	0,834
Vaterita	-7,503	0,411
Smithsonita	-10,571	0,329
ZnCO ₃	-10,571	0,229
Diásporo	6,873	0,1
Hematites	-1,418	0,05

Ecotoxicidad	A12
Microtox	No tóxico

A13 AGUA

	pH	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)
A13	7,1	141	8

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
A13	0,1	<ld	0,6	<ld	2,3	<ld	<ld	<ld	0,2

Iones	F⁻ (mg/l)	Cl⁻ (mg/l)	NO₂⁻ (mg/l)	Br⁻ (mg/l)	NO₃⁻ (mg/l)	SO₄²⁻ (mg/l)	CO₃²⁻ (mg/l)	Na⁺ (mg/l)	K⁺ (mg/l)	Ca²⁺ (mg/l)	Mg²⁺ (mg/l)
A13	0,3	3300	2,1	16	249	1987	1027	2300	64,86	450,0	453,75

MINTEQ		
A13		
Mineral	Log IAP	Sat. Index
Diásporo	6,873	0,8
Dolomita	-17,09	0,2

Ecotoxicidad	A13
Microtox	No tóxico

A14 AGUA

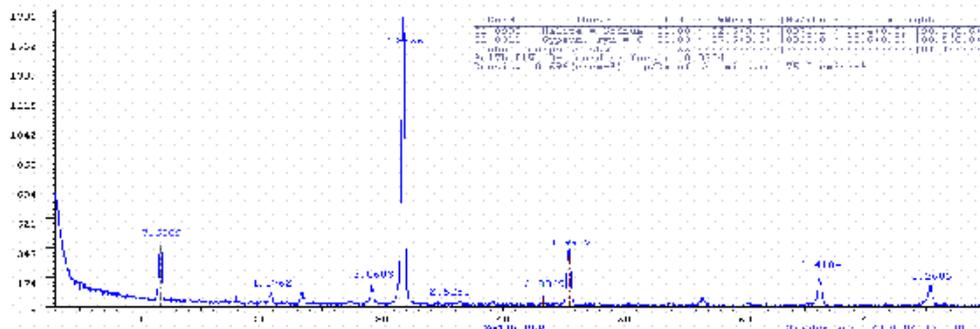
	pH	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)
A14	7,8	114	15,54

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
A14	0,1	<ld	2,6	<ld	1,1	<ld	<ld	0,1	0,4

Iones	F⁻ (mg/l)	Cl⁻ (mg/l)	NO₂⁻ (mg/l)	Br⁻ (mg/l)	NO₃⁻ (mg/l)	SO₄²⁻ (mg/l)	CO₃²⁻ (mg/l)	Na⁺ (mg/l)	K⁺ (mg/l)	Ca²⁺ (mg/l)	Mg²⁺ (mg/l)
A14	1	5561	3,9	25	86,5	1670,5	1701	3680	75,5	438	627

MINTEQ		
A14		
Mineral	Log IAP	Sat. Index
Diásporo	6,873	3,6
Dolomita	-17,09	2,2
Magnesita	-7,46	1,9
Otavita	-12,01	1,3

Ecotoxicidad	A14
Microtox	No tóxico



B7 AGUA

	pH	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)
B7	3,2	422	1,21

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
B7	100	1,6	0,6	0,4	0,2	<ld	0,3	13	53

Iones	F (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	Br ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Li ⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	NH ₄ ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)
B7	0,5	25	0,9	4,2	793	0,08	13,3	1,7	27,7	92	45

MINTEQ		
B7		
Mineral	Log IAP	Sat. Index
Fe(OH) ₂ 7Cl ₃	0,553	3,593

Ecotoxicidad	B7
Microtox	2,3

B8 AGUA

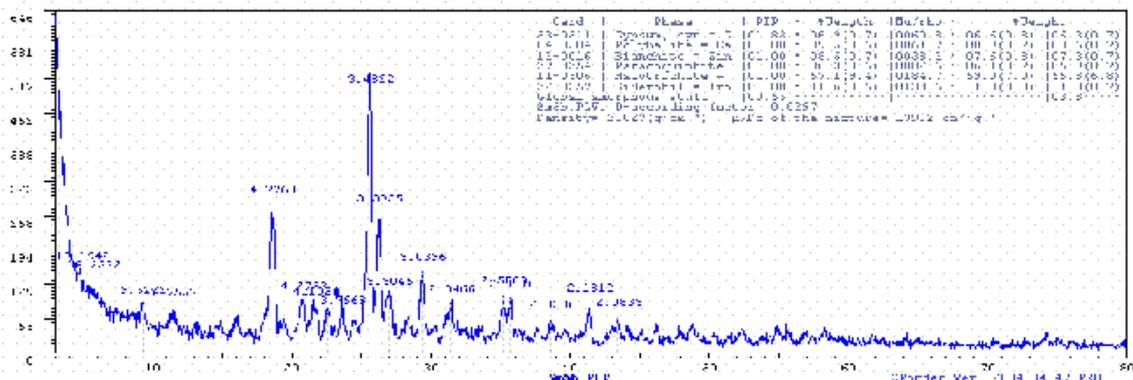
	pH	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)
B8	3,0	500	1,0

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
B8	83	1,3	0,7	7,2	0,6	<ld	0,5	6	56

Iones	F (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	Br ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Li ⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	NH ₄ ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)
B8	0,3	8,4	0,9	3,1	690	0,07	3,8	1,3	20,7	48,4	42

MINTEQ		
B8		
Mineral	Log IAP	Sat. Index
Fe(OH) ₂ 7Cl ₃	1,311	4,351

Ecotoxicidad	B8
Microtox	1,9



B9 AGUA

	pH	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)
B9	3,5	540	8,78

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
B9	1050	4,3	7,6	2,6	3,7	<ld	1,6	110	8,2

Iones	F ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	Br ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Li ⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)
B9	22,7	181	2	80	16792	1,2	191	228	603	1505

MINTEQ		
B9		
Mineral	Log IAP	Sat. Index
Anglesita	5,442	6,86
Fe(OH) ₂ 7Cl ₃	0,935	3,975
Yeso	-4,34	0,27

Ecotoxicidad	B9
Microtox	1,8

B10 AGUA

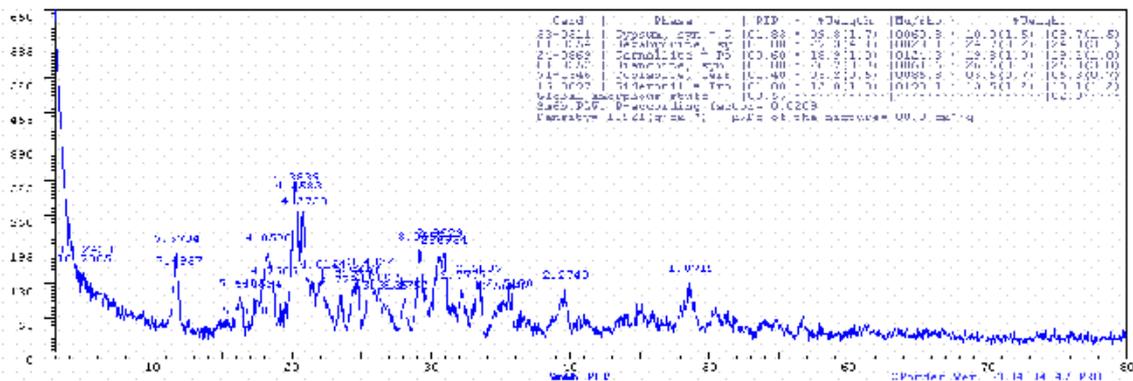
	pH	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)
B10	3,9	484	7,81

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
B10	1015	4,9	4,5	1,8	2	<ld	0,6	75	9

Iones	F ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	Br ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Li ⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)
B10	24	164,5	2	78,5	17000	1,1	170	200	647	1227

MINTEQ		
B10		
Mineral	Log IAP	Sat. Index
Anglesita	-7,587	6,203
Fe(OH) ₂ 7Cl ₃	1,818	4,858
Yeso	-4,298	0,312

Ecotoxicidad	B10
Microtox	1,6



B11 AGUA

	pH	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)
B11	5,3	367	24,6

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
B11	220	0,38	1,4	0,5	0,3	<ld	0,1	2200	0,4

Aniones	F (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	Br ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)
B11	10	1733,3	1	164	32242	904	4366,6	672,7	9892

MINTEQ		
B11		
Mineral	Log IAP	Sat. Index
Alunita	-2,871	8,129
Fe(OH) ₂ ·7Cl ₃	3,796	6,836
Yeso	-4,323	0,287

Ecotoxicidad	B11
Microtox	3,4

B12 AGUA

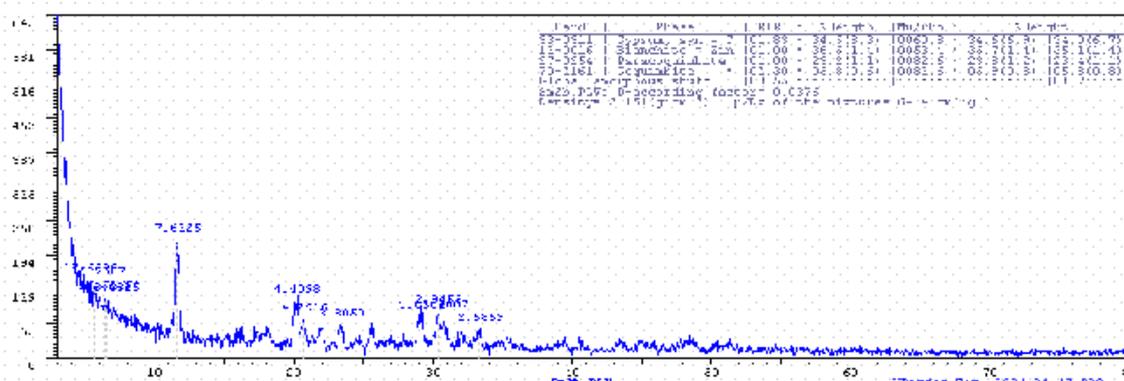
	pH	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)
B12	4,5	412	1,43

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
B12	41,5	3,4	0,004	<ld	<ld	<ld	0,05	55	3

Aniones	F (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	Br ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	NH ₄ ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)
B12	0,3	68,35	0,7	10,7	798	47	2	135	89	180

MINTEQ		
B12		
Mineral	Log IAP	Sat. Index
Alunita	2,677	4,077

Ecotoxicidad	B12
Microtox	2,6



B13 AGUA

	pH	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)
B13	5,6	394	3,63

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
B13	134	3	0,7	0,13	0,9	<ld	0,05	35	0,6

Iones	F ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₂ ⁻ (mg/l)	Br ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Li ⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)
B13	0,3	450,5	0,7	1,9	14,5	2222,5	0,2	243,5	7,9	753	198,5

MINTEQ		
B13		
Mineral	Log IAP	Sat. Index
Diásporo	11,169	12,587
Fe(OH) ₂ 7Cl ₃	3,308	6,348
Yeso	4,493	5,893

Ecotoxicidad	B13
Microtox	10,1

B14 AGUA

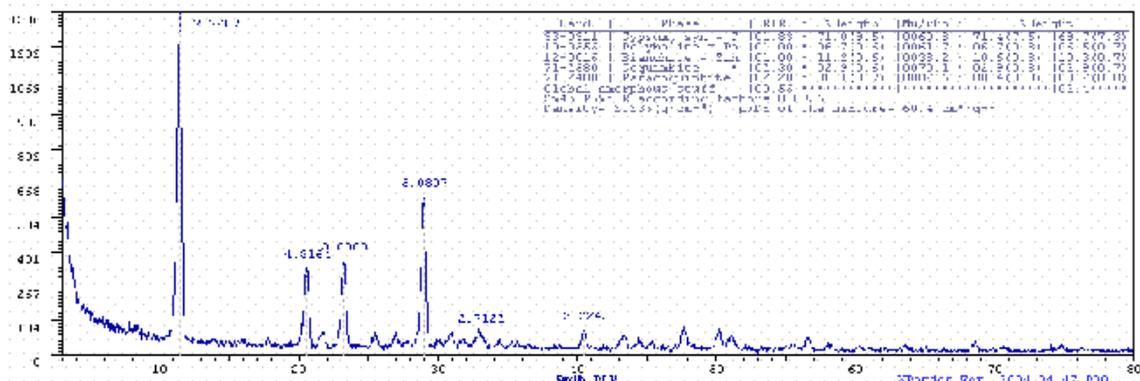
	pH	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)
B14	5,68	235	3,27

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
B14	216	0,7	2,9	<ld	2	<ld	0,003	10	0,6

Aniones	F ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₂ ⁻ (mg/l)	Br ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Li ⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)
B14	0,3	456,6	0,8	1,4	13,3	2145,5	0,2	241	6	656	227

MINTEQ		
B14		
Mineral	Log IAP	Sat. Index
Diásporo	10,162	3,289

Ecotoxicidad	B14
Microtox	9,2



C1 AGUA

	pH	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)
C1	2,1	489	14,6

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
C1	905	0,28	2,8	5900	11675	<ld	12,9	175	7300

Iones	F ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	Br ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Li ⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)
C1	10,5	83,6	33,2	45,5	23650	1,8	4,6	386	734,6	1249,6

MINTEQ		
C1		
	Log IAP	Sat.index
AlOHSO ₄	-2,74	0,49
Alunita	-1,313	0,087

Ecotoxicidad	C1
Microtox	0,2

C2 AGUA

	pH	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)
C2	7,7	293	4,34

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
C2	4,2	0,003	0,4	0,08	1,3	<ld	0,0026	<ld	0,3

Iones	F ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₂ ⁻ (mg/l)	Br ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	CO ₃ ²⁻ (mg/l)	Li ⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)
C2	0,5	141	0,8	0,2	1,3	2228	1005	0,07	153,4	32,4	626,7	735

MINTEQ		
C2		
Mineral	log IAP	Sat. Index
Hematites	14,915	16,333
Hidrocincita	12,103	3,403
Diásporo	10,226	3,353
Dolomita	10,225	2,485

Ecotoxicidad	C2
Microtox	26,3

C3 AGUA

	pH	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)
C3	4,2	367	27,3

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
C3	20000	4	66	0,7	10,3	<ld	2,3	1600	0,45

Iones	F⁻ (mg/l)	Cl⁻ (mg/l)	Br⁻ (mg/l)	NO₃⁻ (mg/l)	SO₄²⁻ (mg/l)	Na⁺ (mg/l)	K⁺ (mg/l)	Ca²⁺ (mg/l)	Mg²⁺ (mg/l)
C3	24,8	337,7	61,2	46,2	62904	40,6	3175	896	7665,5

MINTEQ		
C3		
Mineral	log IAP	Sat. Index
Anglesita	8,161	9,579
Fe(OH) ₂ .7Cl ₃	-4,85	6,15
Yeso	11,25	5,262

Ecotoxicidad	C3
Microtox	1,6

C4 AGUA

	pH	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)
C4	2,8	579	29,6

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
C4	14100	0,2	34	31	6,7	<ld	23	1100	324

Aniones	F (mg/l)	Cl⁻ (mg/l)	Br⁻ (mg/l)	NO₃⁻ (mg/l)	SO₄²⁻ (mg/l)	Li⁺ (mg/l)	K⁺ (mg/l)	Ca²⁺ (mg/l)	Mg²⁺ (mg/l)
C4	42	166	64	9,2	62537	7	2515,5	867	9104

MINTEQ		
C4		
Mineral	log IAP	Sat. Index
Hematites	4,287	5,705
K-Jarosita	-6,41	4,59
Fe(OH) ₂ .7Cl ₃	0,517	3,557
Goethita	2,138	1,647
Lepidocrocita	2,138	0,767
Yeso	-4,122	0,488
Anhidrita	-4,101	0,259

Ecotoxicidad	C4
Microtox	2,92

C5 AGUA

	pH	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)
C5	5,3	353	6,92

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
C5	480	0,1	1,6	0,1	7	<ld	0,1	70	7,8

Aniones	F ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	Br ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Li ⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)
C5	1,8	197	8,9	11	8241	0,6	182	145,4	658	1670

MINTEQ		
C5		
Mineral	log IAP	Sat. Index
Diásporo	10,356	11,774
Fe(OH) ₂ 7Cl ₃	7,262	8,662
Yeso	14,488	8,5
Hematites	2,866	5,906

Ecotoxicidad	C5
Microtox	3,3

C6 AGUA

	pH	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)
C6	4,2	446	2,76

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
C6	370	2,3	2	0,06	2,5	<ld	1	14	37

Iones	F ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	Br ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Li ⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)
C6	1,4	20	1,6	16	2192	0,1	8,2	23	319	185

MINTEQ		
C6		
Mineral	log IAP	Sat. Index
Alunita	3,078	4,478
Fe(OH) ₂ 7Cl ₃	1,336	4,376

Ecotoxicidad	C6
Microtox	5,1

C7 AGUA

	pH	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)
C7	2,96	464	23,4

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
C7	11150	4,7	27	5,4	3,6	<ld	16,4	700	37,5

Iones	F ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₂ ⁻ (mg/l)	Br ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Li ⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)
C7	20,8	119	1,6	35,6	36	40448	4,1	12,3	1603	857	5929

MINTEQ		
C7		
Mineral	log IAP	Sat. Index
Hematites	3,852	5,27
Fe(OH) ₂ 7Cl ₃	0,225	3,265
K-Jarosita	-7,916	3,084
Goethita	1,923	1,432
Lepidocrocita	1,923	0,552
Yeso	-4,203	0,407
Anglesita	-7,546	0,244
Anhidrita	-4,189	0,171

Ecotoxicidad	C7
Microtox	2,3

C8 AGUA

	pH	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)
C8	6,3	333	8,98

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
C8	780	0,1	0,7	0,15	1,7	<ld	0,2	80	0,3

Iones	F ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₂ ⁻ (mg/l)	Br ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Li ⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)
C8	0,8	229,7	0,6	12	23	12232	0,5	168	159	594	2559

MINTEQ		
C8		
Mineral	log IAP	Sat. Index
Diásporo	12,747	14,165
Yeso	18,972	12,984
Hematites	6,625	8,025

Ecotoxicidad	C8
Microtox	2,8

D1 AGUA

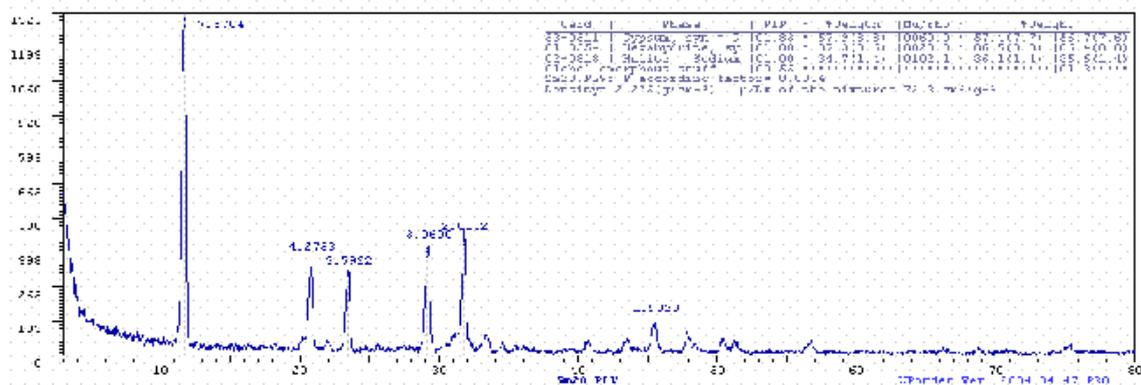
	pH	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)
D1	4,8	434	2,12

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
D1	180	0,9	0,4	<ld	3,7	<ld	0,01	12	2,4

Iones	F (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₂ ⁻ (mg/l)	Br ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)
D1	0,2	366	0,6	1,8	5	1392	215	27	503	76

MINTEQ		
D1		
	Log IAP	Sat. index
Alunita	3,501	4,901
Diásporo	8,686	1,813
Gibbsita	8,686	0,946
Al(OH) ₃	8,686	0,396
Boehmita	8,686	0,108

Ecotoxicidad	D1
Microtox	3,6



D2 AGUA

	pH	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)
D2	2,7	591	2,19

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
D2	44	0,1	1	98,5	<ld	<ld	13	25	63

Iones	F ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	Br ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)
D2	0,9	24	2,1	10,5	2006	6	28	239	32

MINTEQ		
D2		
Mineral	Log IAP	Sat. index
Hematites	6,408	7,826
K-Jarosita	-6,242	4,758
Fe(OH) ₂ 7Cl ₃	1,417	4,457
Goethita	3,204	2,713
Lepidocrocita	3,204	1,833
Maghemita	6,408	0,022
Ferrihidrita	3,204	0,004

Ecotoxicidad	D2
Microtox	6,9

D3 AGUA

	pH	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)
D3	1,9	523	12,62

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
D3	430	0,6	16	1860	15320	<ld	76	270	1140

Iones	F ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	Br ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Li ⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)
D3	1	21	2	12	2345	0,6	5,5	206,5	179	241

MINTEQ		
D3		
Mineral	Log IAP	Sat. Index
Hematites	5,597	7,015
K-Jarosita	-6,006	4,994
Fe(OH) ₂ 7Cl ₃	1,2	4,24
Goethita	2,798	2,307
Lepidocrocita	2,798	1,427
Ferrihidrita	2,798	0,108

Ecotoxicidad	D3
Microtox	0,5

D4 AGUA

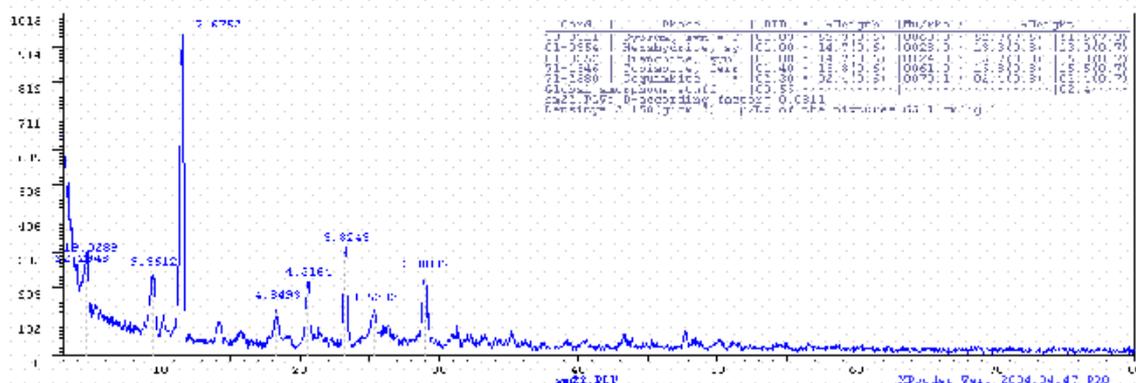
	pH	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)
D4	2,6	616	3,12

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
D4	1020	0,06	2,2	975	458	<ld	20	160	170

Iones	F ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	Br ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Li ⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)
D4	1,3	17	4,4	4	3353	0,4	3,3	146	309	129

MINTEQ		
D4		
Mineral	Log IAP	Sat. index
Hematites	7,942	9,36
K-Jarosita	-3,379	7,621
Fe(OH) ₂ 7Cl ₃	2,164	5,204
Goethita	3,971	3,48
Lepidocrocita	3,971	2,6
H-Jarosita	-3,404	1,986
Maghemita	7,942	1,556
Ferrihidrita	3,97	0,77
Na-Jarosita	-4,785	0,535

Ecotoxicidad	D4
Microtox	2,7



D5 AGUA

	pH	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)
D5	2,1	517	11,19

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
D5	207	0,6	2,2	3810	1192	<ld	34	200	1560

Iones	F⁻ (mg/l)	Cl⁻ (mg/l)	Br⁻ (mg/l)	NO₃⁻ (mg/l)	SO₄²⁻ (mg/l)	Li⁺ (mg/l)	Na⁺ (mg/l)	K⁺ (mg/l)	Ca²⁺ (mg/l)	Mg²⁺ (mg/l)
D5	1	12,4	4,2	4	2989	0,2	1,9	98	71,4	129

MINTEQ		
D5		
Mineral	Log IAP	Sat. index
Hematites	6,756	8,174
K-Jarosita	-5,128	5,872
Fe(OH) ₂ 7Cl ₃	1,667	4,707
Goethita	3,377	2,886
Lepidocrocita	3,377	2,006
H-Jarosita	-4,455	0,935
Maghemita	6,756	0,37
Ferrihidrita	3,377	0,177

Ecotoxicidad	D5
Microtox	1,6

D6 AGUA

	pH	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)
D6	2,7	600	1,72

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
D6	33	0,09	1	31,5	0,5	<ld	3,1	15	60

Iones	Cl⁻ (mg/l)	Br⁻ (mg/l)	NO₃⁻ (mg/l)	SO₄²⁻ (mg/l)	Li⁺ (mg/l)	Na⁺ (mg/l)	K⁺ (mg/l)	Ca²⁺ (mg/l)	Mg²⁺ (mg/l)
D6	11,2	2,3	7	1897	0,1	2,6	46	239	45

MINTEQ		
D6		
Mineral	Log IAP	Sat. index
Hematites	5,528	6,946
Fe(OH) ₂ 7Cl ₃	0,87	3,91
K-Jarosita	-7,393	3,607
Goethita	2,764	2,273
Lepidocrocita	2,764	1,393
Cupric Ferrite	6,149	0,16
Ferrihidrita	2,764	0,074

Ecotoxicidad	D6
Microtox	6,9

D7 AGUA

	pH	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)
D7	5,3	398	2,66

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
D7	210	0,8	2,2	<ld	2,6	<ld	0,03	72,5	1,3

Aniones	F⁻ (mg/l)	Cl⁻ (mg/l)	Br⁻ (mg/l)	NO₃⁻ (mg/l)	SO₄²⁻ (mg/l)	Li⁺ (mg/l)	Na⁺ (mg/l)	NH₄⁺ (mg/l)	K⁺ (mg/l)	Ca²⁺ (mg/l)	Mg²⁺ (mg/l)
D7	0,6	127	2,3	18,3	2016	0,2	69	1,6	125	451	229

MINTEQ		
D7		
Mineral	Log IAP	Sat. Index
Alunita	5,243	6,643
Diásporo	9,411	2,538
Al ₄ (OH) ₁₀ SO ₄	24,811	2,111
Gibbsita	9,411	1,671
Al(OH) ₃	9,411	1,121
Boehmita	9,411	0,833

Ecotoxicidad	D7
Microtox	21,6

D8 AGUA

	pH	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)
D8	2,4	498	15,59

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
D8	6450	3,6	42	268	4	<ld	3,4	1110	1,8

Iones	F⁻ (mg/l)	Cl⁻ (mg/l)	Br⁻ (mg/l)	NO₃⁻ (mg/l)	SO₄²⁻ (mg/l)	Li⁺ (mg/l)	Na⁺ (mg/l)	K⁺ (mg/l)	Ca²⁺ (mg/l)	Mg²⁺ (mg/l)
D8	12	114	10	21	9140	0,4	25	445	156	635

MINTEQ		
D8		
Mineral	Log IAP	Sat. Index
Hematites	5,148	6,566
K-Jarosita	-5,898	5,102
Fe(OH) ₂ 7Cl ₃	1,04	4,08
Goethita	2,573	2,082
Lepidocrocita	2,573	1,202
Anglesita	-7,753	0,037

Ecotoxicidad	D8
Microtox	1,6

D9 AGUA

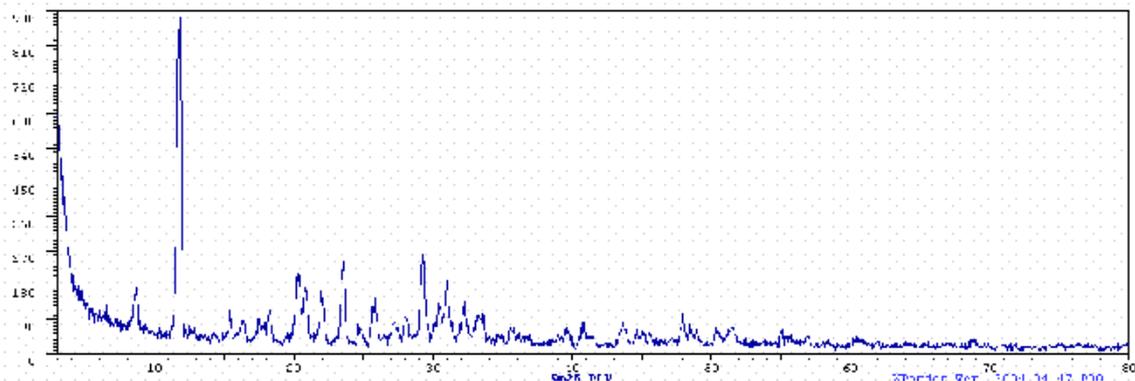
	pH	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)
D9	4,0	405	5,71

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
D9	200	1,2	1,1	0,5	4,4	<ld	0,05	75	72

Iones	F ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₂ ⁻ (mg/l)	Br ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Li ⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)
D9	3	1032	3	2,1	9	6217	0,8	570	223	773	978

MINTEQ		
D9		
Mineral	Log IAP	Sat. Index
Hematites	7,968	9,386
Fe(OH) ₂ 7Cl ₃	2,281	5,321
K-Jarosita	-6,349	4,651
Alunita	3,077	4,477
Goethita	3,983	3,492
Lepidocrocita	3,983	2,612
Maghemita	7,968	1,582
Ferrihidrita	3,982	0,782
AlOHSO ₄	-2,816	0,414
Diásporo	7,125	0,252
Yeso	-4,429	0,181

Ecotoxicidad	D9
Microtox	1,8



D10 AGUA

	pH	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)
D10	3,1	362	28,5

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
D10	540	2,3	25	5,3	5	<ld	0,2	357	70

Iones	Cl⁻ (mg/l)	Br⁻ (mg/l)	NO₃⁻ (mg/l)	SO₄²⁻ (mg/l)	Na⁺ (mg/l)	K⁺ (mg/l)	Ca²⁺ (mg/l)	Mg²⁺ (mg/l)
D10	622	4,5	136	2707	365	175		1513

MINTEQ		
D10		
Mineral	Log IAP	Sat. Index
Hematites	5,949	7,367
Fe(OH) ₂ 7Cl ₃	1,484	4,524
K-Jarosita	-7,583	3,417
Goethita	2,974	2,483
Lepidocrocita	2,974	1,603
Ferrihidrita	2,973	0,283

Ecotoxicidad	D10
Microtox	1,9

D11 AGUA

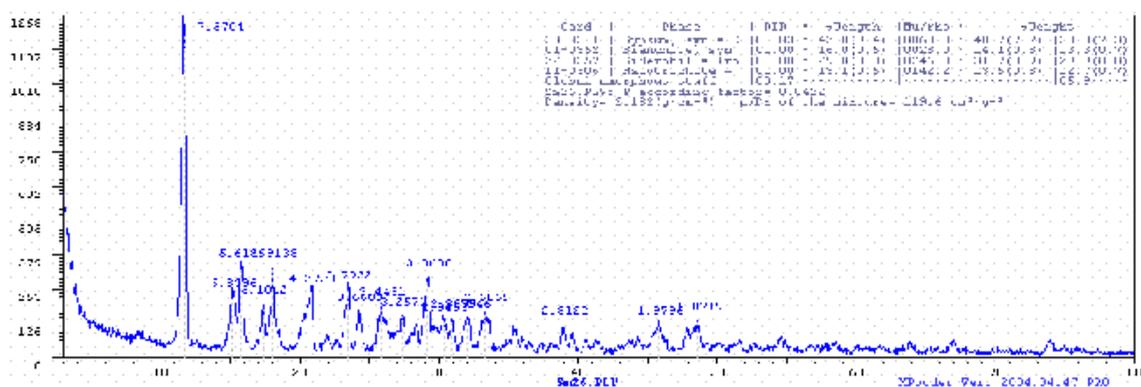
	pH	Eh (mV)	CE (ds m ⁻¹)
D11	4,3	365	7,95

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
D11	618	2,6	2,6	130,5	4,4	<ld	0,04	170	5

Iones	F (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₂ ⁻ (mg/l)	Br ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)
D11	0,3	264	3,5	1,4	8,5	5759	285	371	671	1288

MINTEQ		
D11		
Mineral	Log IAP	Sat. Index
Hematites	13,695	15,113
K-Jarosita	1,493	12,493
Fe(OH) ₂ 7Cl ₃	4,884	7,924
Maghemita	13,695	7,309
Na-Jarosita	1,616	6,936
Goethita	6,847	6,356
Lepidocrocita	6,847	5,476
H-Jarosita	-0,593	4,797
Ferrihidrita	6,846	3,646
Magnesioferrita	20,26	3,4
Alunita	1,528	2,928
Yeso	-4,537	0,073

Ecotoxicidad	D11
Microtox	6,1



D12 AGUA

	pH	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)
D12	1,7	476	43,8

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
D12	7750	2,2	55	26150	15882	<ld	19	3110	1093

Iones	F ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₂ ⁻ (mg/l)	Br ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)
D12	0,4	271	3	1,2	10	5421	277	917	139

MINTEQ		
D12		
Mineral	Log IAP	Sat. Index
Hematites	13,695	15,113
K-Jarosita	1,493	12,493
Fe(OH) ₂ 7Cl ₃	4,884	7,924
Maghemita	13,695	7,309
Na-Jarosita	1,616	6,936
Goethita	6,847	6,356
Lepidocrocita	6,847	5,476
H-Jarosita	-0,593	4,797
Ferrihidrita	6,846	3,646
Magnesioferrita	20,26	3,4
Alunita	1,528	2,928
Yeso	-4,537	0,073

Ecotoxicidad	D12
Microtox	1,7

D13 AGUA

	pH	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)
D13	3,3	479	28,3

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
D13	9400	0,9	41	1240	8133	<ld	10	1880	1400

Iones	F⁻ (mg/l)	Cl⁻ (mg/l)	NO₃⁻ (mg/l)	SO₄²⁻ (mg/l)	Na⁺ (mg/l)	K⁺ (mg/l)	Ca²⁺ (mg/l)	Mg²⁺ (mg/l)
D13	1,4	23	20	1151	44,5	199	222	50

MINTEQ		
D13		
Mineral	Log IAP	Sat. Index
Hematites	11,152	12,57
K-Jarosita	-1,701	9,299
Fe(OH) ₂ 7Cl ₃	3,582	6,622
Goethita	5,575	5,084
Maghemita	11,152	4,766
Lepidocrocita	5,575	4,204
Na-Jarosita	-2,12	3,2
Ferrihidrita	5,574	2,884
H-Jarosita	-2,531	2,859

Ecotoxicidad	D13
Microtox	0,2

E4 AGUA

	pH	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)
E4	7,7	144	9,43

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
E4	0,08	<ld	3	<ld	<ld	<ld	<ld	0,5	0,22

Iones	F (mg/l)	Cl (mg/l)	NO₂⁻ (mg/l)	Br⁻ (mg/l)	NO₃⁻ (mg/l)	SO₄²⁻ (mg/l)	CO₃²⁻ (mg/l)	Na⁺ (mg/l)	Ca²⁺ (mg/l)	Mg²⁺ (mg/l)
E4	0,2	3266	2,9	<ld	31,1	1962	767	1649	560	726

MINTEQ		
E4		
Mineral	Log IAP	Sat. Index
Diásporo	10,068	3,195
Dolomita	-14,072	3,018
Otavita	-10,46	1,55

Ecotoxicidad	E4
Microtox	No tóxico

E9 AGUA

	pH	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)
E9	6,6	389	0,466

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
E9	12,5	0,6	0,3	1	<ld	<ld	0,05	1,2	0,2

Iones	F ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₂ ⁻ (mg/l)	Br ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	CO ₃ ²⁻ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)
E9	0,1	45	0,5	0,1	11	234	336	35	5,3	280	43

MINTEQ		
E9		
Mineral	Log IAP	Sat. Index
Diásporo	6,873	0,642
Hematites	-1,418	0,555

Ecotoxicidad	E9
Microtox	No tóxico

E10 AGUA

	pH	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)
E10	7,4	236	0,782

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
E10	15	0,8	0,3	1,5	<ld	<ld	0,06	0,9	0,2

Iones	F ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₂ ⁻ (mg/l)	Br ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	CO ₃ ²⁻ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)
E10	0,1	50	0,5	0,1	11	286	295	25	1,23	390	66

MINTEQ		
E10		
Mineral	Log IAP	Sat. Index
Diásporo	8,29	1,417
Gibbsita	8,29	0,55
Al(OH) ₃	8,29	0
Cerusita	-13,2	0
Hematites	-1,418	0
Otavita	-12,01	0
Rodocrosita	-11	0
Smithsonita	-10,9	0

Ecotoxicidad	E10
Microtox	No tóxico

E11 AGUA

	pH	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)
E11	8,3	70	48,1

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
E11	0,4	0,8	0,5	7,2	10	<ld	0,2	0,7	0,2

Iones	F ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₂ ⁻ (mg/l)	Br ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	CO ₃ ²⁻ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)
E11	6,3	13799	15,3	59	15	33444	64,5	15389	423	446	4715

MINTEQ		
E11		
Mineral	Log IAP	Sat. Index
Hidrocerusita	-16,701	2,059
Larnakita	0,889	1,323
Pb(OH) ₂	9,459	1,309
Pb ₂ (OH) ₃ Cl	9,993	1,2
Dolomita	-16,54	0,55
Yeso	-4,446	0,164
Cerusita	-13,08	0,12
Diásporo	6,873	0
Hematites	-1,418	0

Ecotoxicidad	E11
Microtox	9,8

E12 AGUA

	pH	Eh (mV)	CE (ds m⁻¹)
E12	7,8	301	11,62

Elementos traza	Zn (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Fe (mg/l)	As (µg/l)	Hg (µg/l)	Cu (mg/l)	Mn (mg/l)	Al (mg/l)
E12	0,13	<ld	0,002	0,12	<ld	<ld	<ld	<ld	0,26

Iones	F (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₂ ⁻ (mg/l)	Br ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	CO ₃ ²⁻ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)
E12	0,2	4124	3,1	<ld	19,4	1924	1122	2234	646	792

MINTEQ		
E12		
Mineral	Log IAP	Sat. Index
Diásporo	10,072	3,199
Dolomita	-14,072	3,018
Gibbsita	10,07	2,33
Huntita	-27,805	2,163
Al(OH) ₃	10,07	1,78
Otavita	-10,46	1,55
Boehmita	10,072	1,494
Calcita	-7,205	1,275
Aragonito	-7,205	1,131
Vaterita	-7,205	0,708
Magnesita	-6,867	0,593
Rhodocrosita	-10,454	0,546
Al ₂ O ₃	20,146	0,493
MnCO ₃ (am)	-10,454	0,046

Ecotoxicidad	E12
Microtox	No tóxico