



Contaminación de suelos por el vertido tóxico de la mina de Aznalcollar, Doñana. (Dos años después)

Departamento de Edafología de la Universidad de
Granada



- Aguilar, J.
- Dorronsoro, C.
- Fernández, J.
- Fernández, E.
- García, I.
- Martín, F.
- Ortiz, I.
- Simón, M.

• El accidente



1. EL ACCIDENTE
la mina
2. LA CONTAMINACION
3. LA RECUPERACION





1. EL ACCIDENTE

la mina

2. LA CONTAMINACION

3. LA RECUPERACION



Pirita 83%
Blenda 5%
Galena 2%
Calcopirita 1%
Arsenopirita 1%

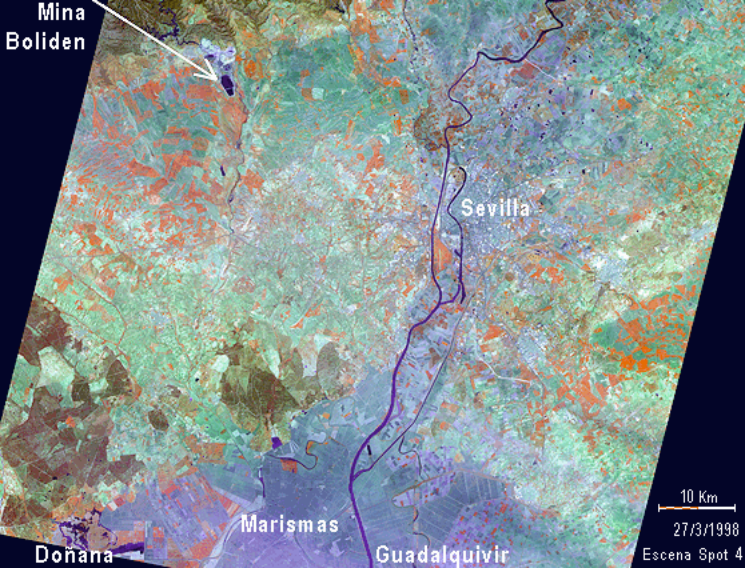


1. EL ACCIDENTE

La Mina: situación geográfica

2. LA CONTAMINACION

3. LA RECUPERACION



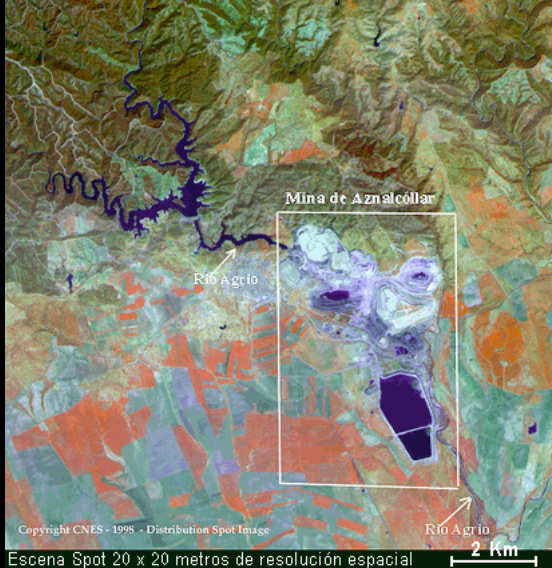


1. EL ACCIDENTE

La Mina: geomorfología

2. LA CONTAMINACION

3. LA RECUPERACION



1. EL ACCIDENTE

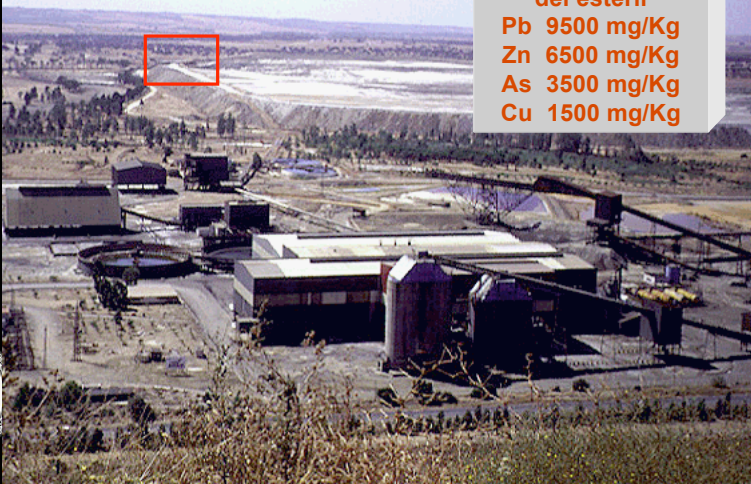
La Mina: rotura de la balsa

2. LA CONTAMINACION

3. LA RECUPERACION



25/Abril /1998



Composición del estéril

Pb 9500 mg/Kg

Zn 6500 mg/Kg

As 3500 mg/Kg

Cu 1500 mg/Kg



1. EL ACCIDENTE
localización de la riada
2. LA CONTAMINACION
3. LA RECUPERACION





1. EL ACCIDENTE
fondo de la balsa
2. LA CONTAMINACION
3. LA RECUPERACION





1. EL ACCIDENTE

Arrastre de los lodos del fondo balsa

2. LA CONTAMINACION

3. LA RECUPERACION





1. EL ACCIDENTE
localización de la riada
2. LA CONTAMINACION
3. LA RECUPERACION



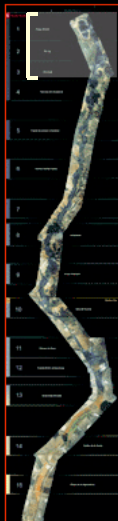


1. EL ACCIDENTE

30/4/98 salida lodos al río Agrio

2. LA CONTAMINACION

3. LA RECUPERACION

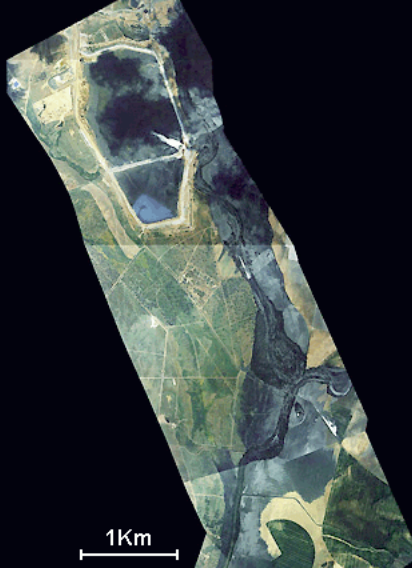


Presa BOLIDEN

Rio Agrio

Rio Guadiamar

30/4/98





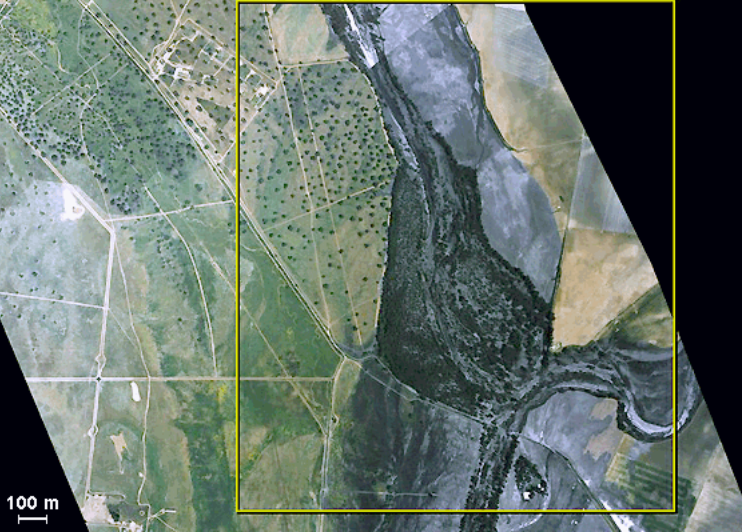
1. EL ACCIDENTE

30/4/98 confluencia de ríos

2. LA CONTAMINACION

3. LA RECUPERACION

100 m



Confluencia de los ríos Agrio y Guadiamar.

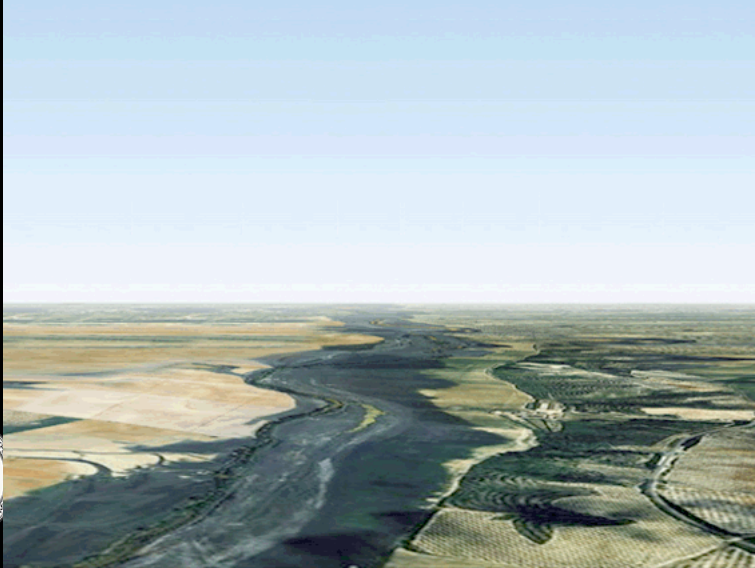


1. EL ACCIDENTE

30/4/98 vertido aguas abajo

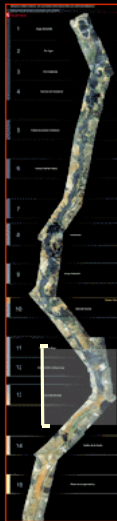
2. LA CONTAMINACION

3. LA RECUPERACION





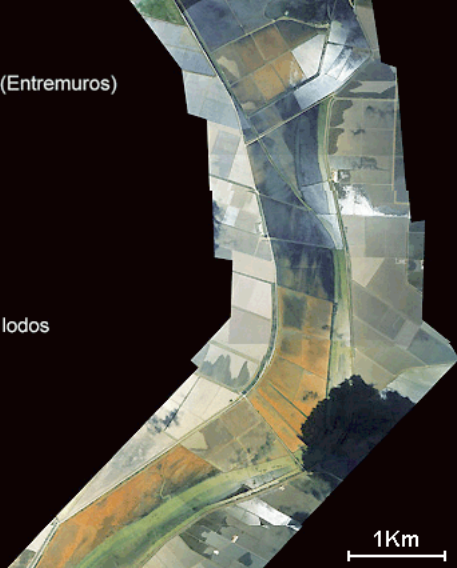
1. EL ACCIDENTE
zona límite de los lodos
2. LA CONTAMINACION
3. LA RECUPERACION



Puente Simón (Entremuros)

Zona límite de lodos

30/4/98



1Km



1. EL ACCIDENTE
zona límite de los lodos
2. LA CONTAMINACION
3. LA RECUPERACION



100 m



1. EL ACCIDENTE
zona límite de las aguas
2. LA CONTAMINACION
3. LA RECUPERACION



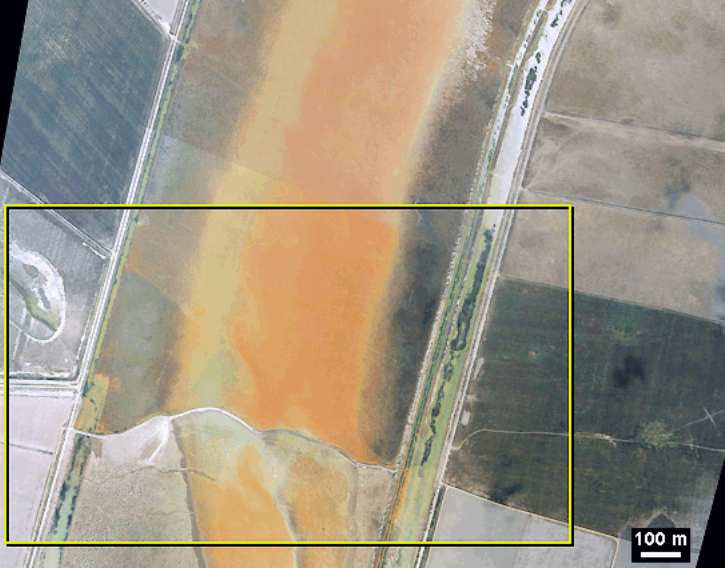
30/4/98



Lucio del Cangrejo



1. EL ACCIDENTE
zona límite de las aguas
2. LA CONTAMINACION
3. LA RECUPERACION





1. EL ACCIDENTE
represa en el Lucio del Cangrejo
2. LA CONTAMINACION
3. LA RECUPERACION





1. EL ACCIDENTE
retención de agua preocupante
2. LA CONTAMINACION
3. LA RECUPERACION





1. EL ACCIDENTE

depuradora en el Lucio del Cangrejo

2. LA CONTAMINACION

3. LA RECUPERACION





La riada

- Localización
- **Extensión**

Vertido 4,5 Hm³ : 3,6 Hm³ de agua y 0,9 Hm³ lodos

Superficie afectada 4.402 Ha

Longitud del vertido de lodos 40 Km

Anchura 400 m, variable



1. EL ACCIDENTE
invasión de las vaguadas
2. LA CONTAMINACION
3. LA RECUPERACION

30 - Abril - 1998

100 m





1. EL ACCIDENTE
inundación de las llanuras
2. LA CONTAMINACION
3. LA RECUPERACION





1. EL ACCIDENTE
 espesor de la capa de lodos
2. LA CONTAMINACION
3. LA RECUPERACION





1. EL ACCIDENTE
espesor de la capa de lodos
2. LA CONTAMINACION
3. LA RECUPERACION





1. EL ACCIDENTE
espesor de los lodos muy variable
2. LA CONTAMINACION
3. LA RECUPERACION

30 - Abril - 1998

100 m





1. EL ACCIDENTE
espesor de los lodos muy variable
2. LA CONTAMINACION
3. LA RECUPERACION





1. EL ACCIDENTE

espesor de lodos usual: 8 cm

2. LA CONTAMINACION

3. LA RECUPERACION





- El accidente
- Contaminación de los suelos

4 de Mayo 1998 (10 días después del vertido)

- aguas
- lodos
- suelos no afectados
- suelos contaminados



1. EL ACCIDENTE
2. LA CONTAMINACION
puntos muestrales
3. LA RECUPERACION

SECTOR NORTE

2 Soberbina

3 Las Doblas



Autovia
Sevilla - Huelva

SECTOR CENTRAL

4 Aznalcazar

1 Km



SECTOR SUR

Aznalcazar

5 Quema

Puente D. Simón
6 Los Pobres
Pescante

Límite de los lodos

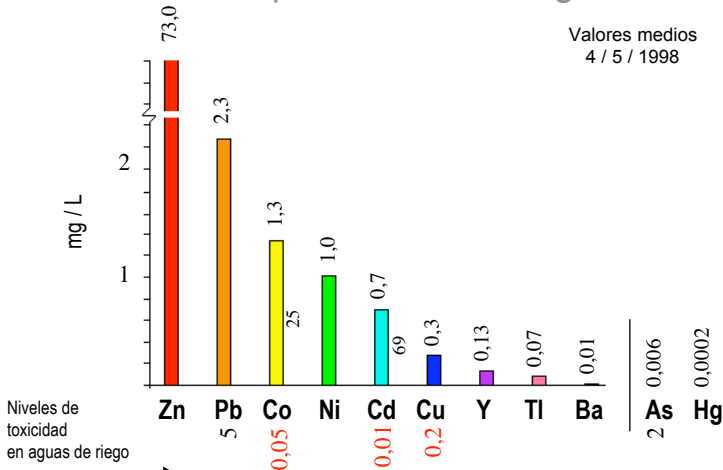




1. EL ACCIDENTE
2. LA CONTAMINACION
los contaminantes: aguas
3. LA RECUPERACION

Metales pesados en las aguas

Valores medios
4 / 5 / 1998

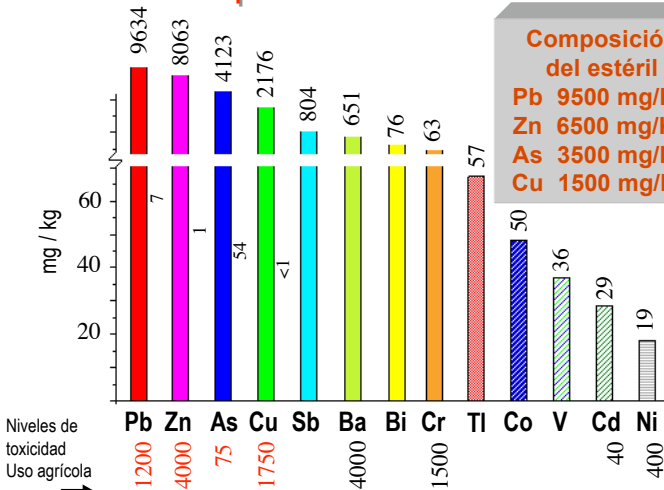


(máximo recomendado por US-EPA, según Crook y Bastian, 1992)



1. EL ACCIDENTE
2. LA CONTAMINACION
los contaminantes: lodos
3. LA RECUPERACION

Metales pesados en los lodos



Composición del estéril

Pb 9500 mg/Kg
Zn 6500 mg/Kg
As 3500 mg/Kg
Cu 1500 mg/Kg

(BOE 1/10/90, suelos de pH≥7; excepto para el As que se ha tomado el umbral de USA y Canadá)



Características de los lodos

Textura: franco limosa, >70% de limo

Permeabilidad: muy alta

Retención de agua: muy elevada

pH: ácido (4,3 - 5,1)

CaCO₃: 0%

Materia orgánica: 0%



Características de los suelos

Estructura, muy variable: de fuerte (bloques) a masiva

Textura, variable: de franco arcillosa (P) a franco arenosa (S)

Materia orgánica: 0,9 - 2,9%

Gravas, muy variable: 0 - 43%

pH: 7,2 - 8,1

CaCO₃: 0 - 20 %

Capacidad cambio cationes: 8-31 cmolc kg⁻¹

Fe_d: 0,8-1,5%

Clase de suelos: Xerofluvents y Xerorthents, típicos.

Fluvisoles y Regosoles, calcáricos y eútricos.



Vías de contaminación del suelo

3 fechas de muestreo: 4 mayo, 20 mayo y 4 junio (10, 25 y 40 días)

- **Contaminación inicial**

Llegada de las aguas y de los lodos

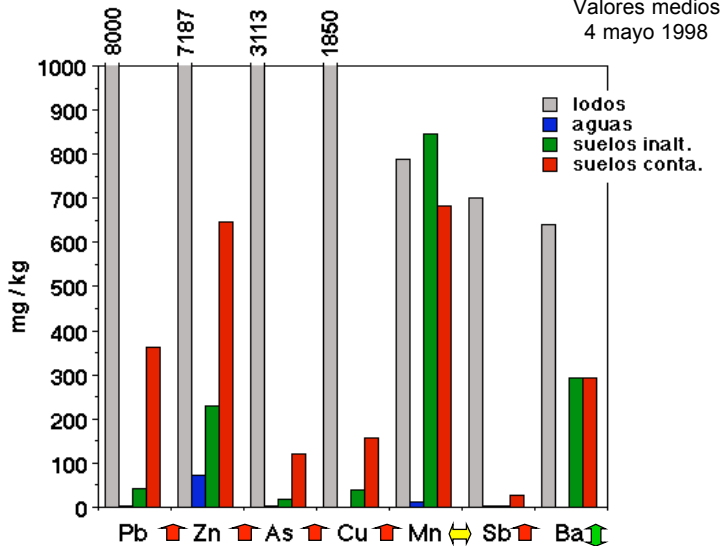


1. EL ACCIDENTE

2. LA CONTAMINACION

los más abundantes contaminantes

3. LA RECUPERACION





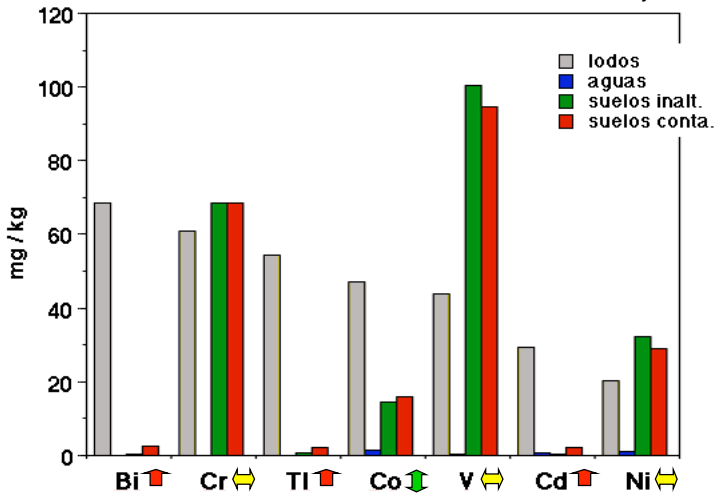
1. EL ACCIDENTE

2. LA CONTAMINACION

los contaminantes de 100-10 mg/Kg

3. LA RECUPERACION

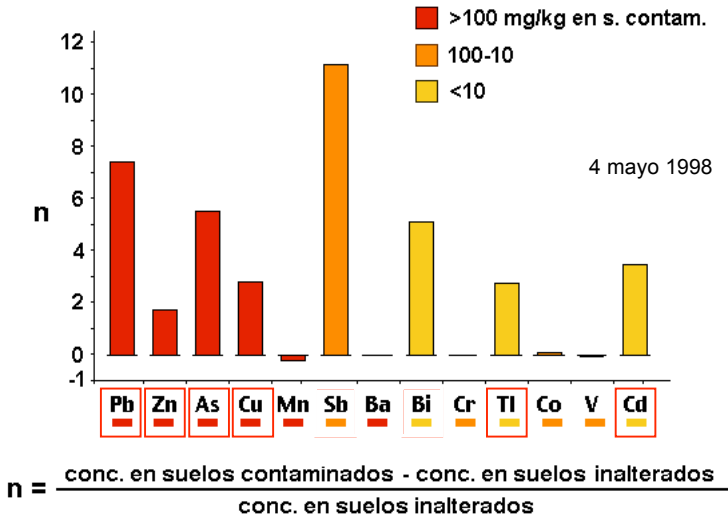
Valores medios
4 mayo 1998





1. EL ACCIDENTE
2. LA CONTAMINACION
3. LA RECUPERACION

conc. metales en los suelos contam.



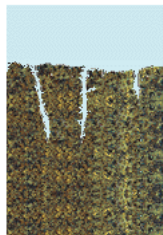
1. EL ACCIDENTE
2. LA CONTAMINACION
la contaminantes inicial
3. LA RECUPERACION



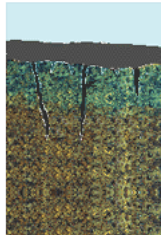
Vias de contaminación del suelo



Contaminación inicial directa del suelo por las agua y por los lodos



riada tóxica





Composición de las aguas

Elem.	mg / kg			DS
	Máximo	Mínimo	Media	
Mn	11,56	10,93	11,21	0,32
Zn	74,81	71,38	72,77	1,81
Pb	2,6	2,05	2,26	0,29
Co	1,48	1,11	1,29	0,19
Ni	1,01	0,97	0,01	0,02
Cd	0,75	0,64	0	0,06
Cu	0,4	0,24	0,31	0,08
Y	0,16	0,1	0,13	0,03
Tl	0,07	0,07	0,07	0,00
Ba	0,01	0,01	0,01	0,00

Elem.	µg / kg			DS
	Máximo	Mínimo	Media	
Sc	7,07	5	5,69	1,19
Se	4,86	2,94	3,92	0,96
As	4,3	1,74	2,79	1,34
Sb	2,96	2,4	2,62	0,3
Be	1,87	1,23	1,53	0,32
U	1,83	1,49	1,63	0,18
V	0,49	0,28	0,36	0,11
Th	0,37	0,27	0,31	0,05
Hg	0,19	0,15	0,17	0,02
In	0,06	0,03	0,04	0,01
Sn	0,00	0,00	0,00	0,00
Bi	0,00	0,00	0,00	0,00
Cr	0,00	0,00	0,00	0,00
Mo	0,00	0,00	0,00	0,00



1. EL ACCIDENTE
2. LA CONTAMINACION
cantidad entrada lodo en cada suelo
3. LA RECUPERACION

$$Z = (SC_{Bi} - SnoC_{Bi}) / L_{Bi}$$

Z = cantidad de lodo que ha penetrado en cada suelo

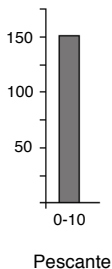
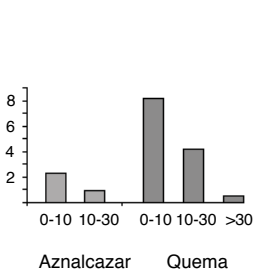
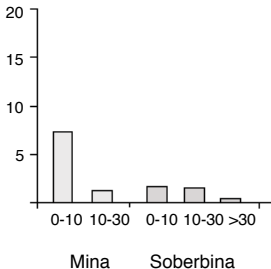
SC_{Bi} = concentración de Bi en el suelo contaminado

$SnoC_{Bi}$ = concentración de Bi en el suelo no contaminado

L_{Bi} = concentración de Bi en el lodo

Contaminación por lodo

g / kg





1. EL ACCIDENTE

2. LA CONTAMINACION

entrada lodo escasa: contacto neto

3. LA RECUPERACION





1. EL ACCIDENTE
2. LA CONTAMINACION
abundante entrada lodo por grietas
3. LA RECUPERACION





1. EL ACCIDENTE
2. LA CONTAMINACION
entrada lodo y estructura del suelo
3. LA RECUPERACION



Quema

Estructura poco desarrollada.
Contacto neto. Penetración pequeña.



Pescante

Estructura muy desarrollada.
Amplias grietas. Penetración intensa.

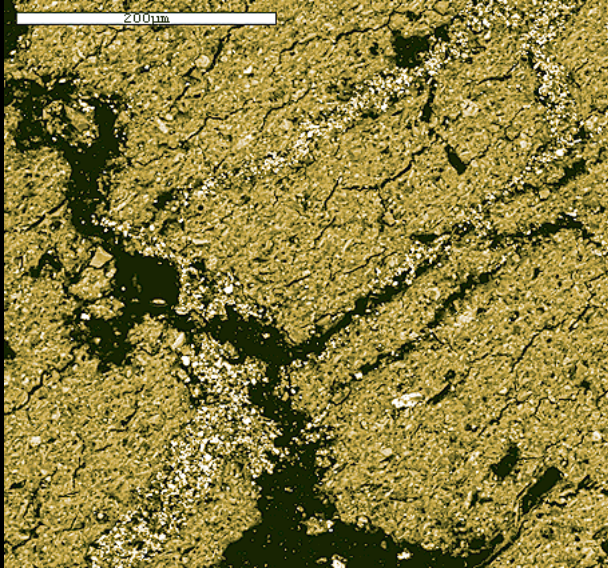


1. EL ACCIDENTE
2. LA CONTAMINACION
entrada lodo abundante en grietas.
3. LA RECUPERACION





1. EL ACCIDENTE
2. LA CONTAMINACION
entrada lodo en grietas; foto SEM.
3. LA RECUPERACION



suelo



lodo



huecos

Foto SEM
Electrones
Retrodisper.

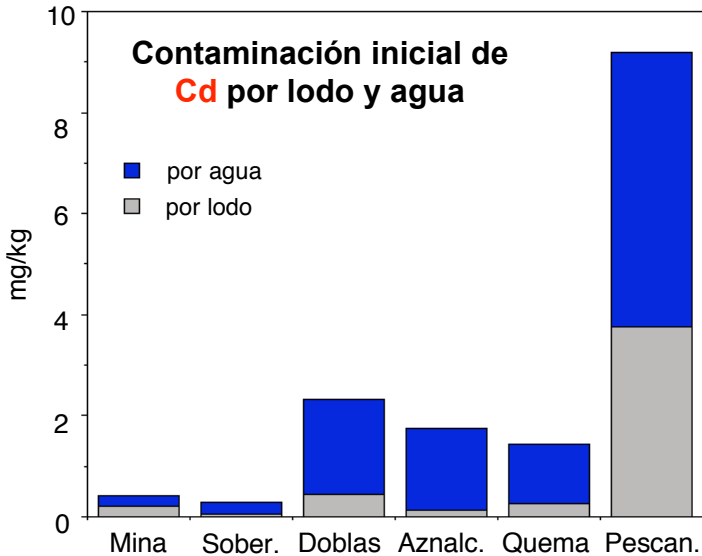
Cálculo de la contaminación inicial por el lodo y el agua

Z g/kg	Param.	Sb	Bi	Tl	As	Pb	Cu	Zn	Cd
7,4	SCI-SNCI	2,59	0,31	0,32	11,5	42,6	16,8	98,7	0,41
Mina	lodo %	100	100	96	95	76	71	54	52
	agua %	0	0	4	5	24	29	46	48
1,7	SCI-SNCI	1,16	0,12	0,11	4,34	20,9	21,7	59,9	0,29
Soberbina	lodo %	100	100	97	89	68	15	19	16
	agua %	0	0	3	11	32	85	81	84
12,5	SCI-SNCI	9,78	1,07	0,86	52,1	198,3	124,8	472	2,32
Doblas	lodo %	100	100	97	98	60	22	21	19
	agua %	0	0	3	2	40	78	79	81
3,7	SCI-SNCI	2,93	0,32	0,25	16,1	58,3	41,5	345,1	1,76
Aznalcazar	lodo %	100	100	97	95	61	19	8	8
	agua %	0	0	3	5	39	81	92	92
9,4	SCI-SNCI	7,22	0,76	0,57	34,8	100,2	153	261	1,44
Quema	lodo %	100	100	100	100	90	12	25	19
	agua %	0	0	0	0	10	88	75	81
153,5	SCI-SNCI	129,9	11,7	8,69	572,2	1710,9	52,9	3266,4	9,18
Pescante	lodo %	100	100	95	100	86	88	34	41
	agua %	0	0	5	0	14	12	66	59
valor medio	lodo %	100	100	97	96	63	38	27	26
	agua %	0	0	3	4	37	62	73	74



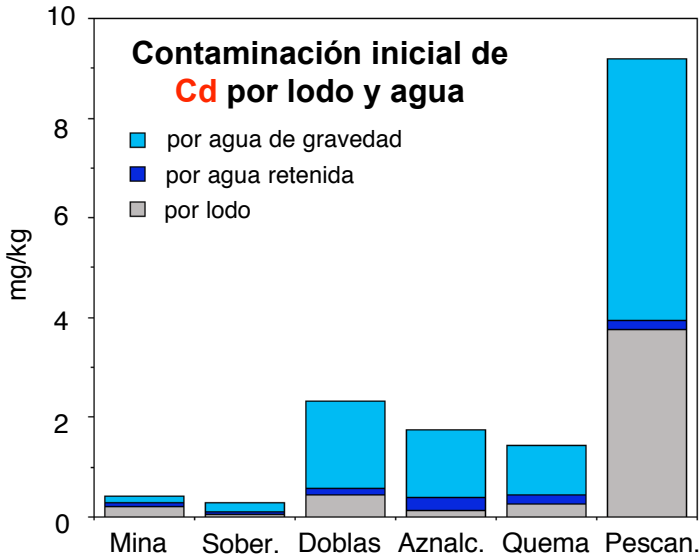


1. EL ACCIDENTE
2. LA CONTAMINACION
 entrada de Cd por lodo y por agua
3. LA RECUPERACION





1. EL ACCIDENTE
2. LA CONTAMINACION
 entrada de Cd por lodo y por agua
3. LA RECUPERACION





1. EL ACCIDENTE
2. LA CONTAMINACION
contaminación secundaria
3. LA RECUPERACION

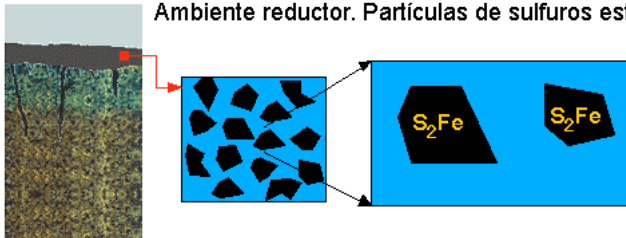
Vias de contaminación del suelo

Contaminación inicial

Contaminación secundaria

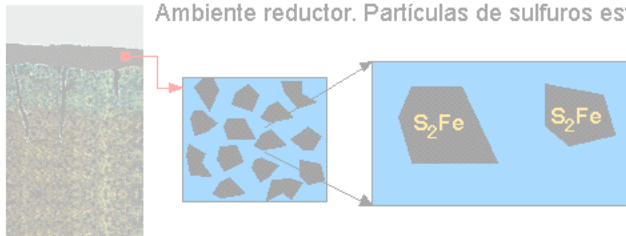


Situación inicial. Lodos completamente saturados en agua.
Ambiente reductor. Partículas de sulfuros estables.



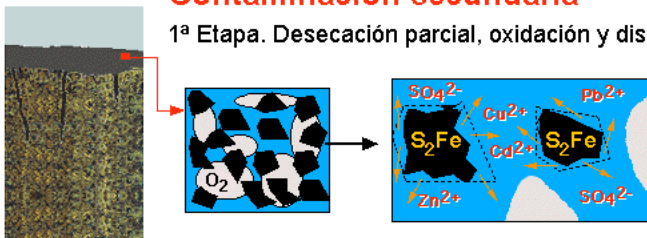


Situación inicial. Lodos completamente saturados en agua.
Ambiente reductor. Partículas de sulfuros estables.



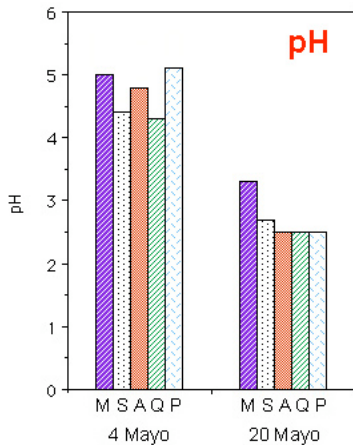
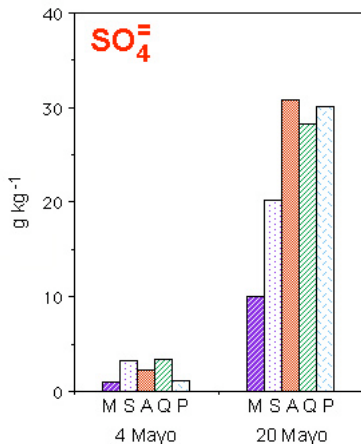
Contaminación secundaria

1ª Etapa. Desecación parcial, oxidación y disolución.





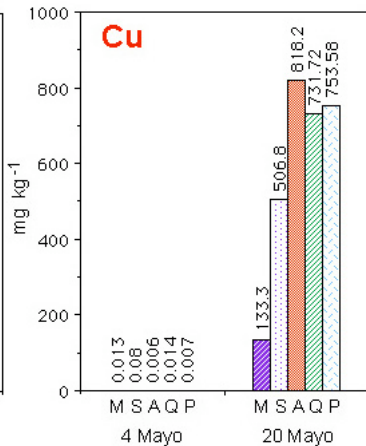
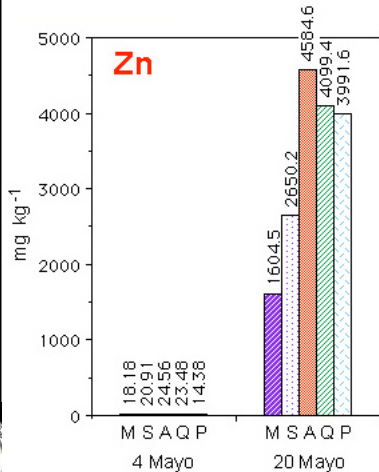
1. EL ACCIDENTE
2. LA CONTAMINACION
extractos solubles lodos
3. LA RECUPERACION



Extractos solubles de los lodos



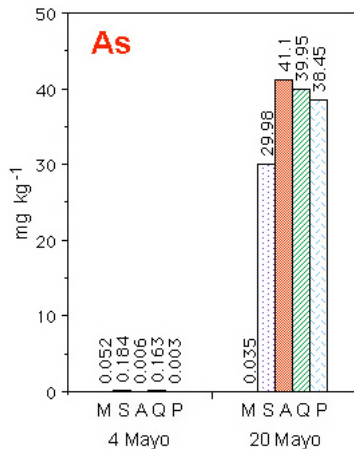
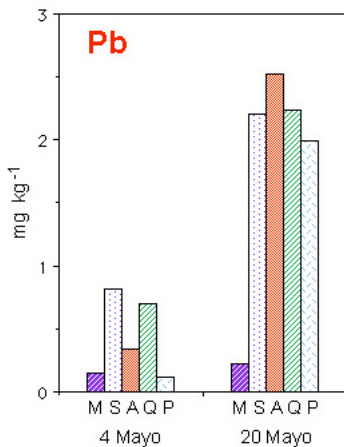
1. EL ACCIDENTE
2. LA CONTAMINACION
extractos solubles lodos
3. LA RECUPERACION



Extractos solubles de los lodos



1. EL ACCIDENTE
2. LA CONTAMINACION
extractos solubles lodos
3. LA RECUPERACION

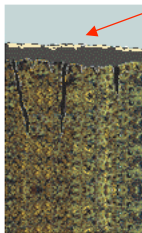
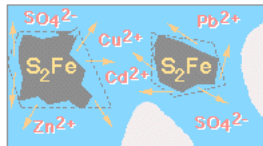
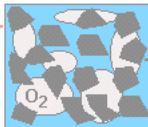
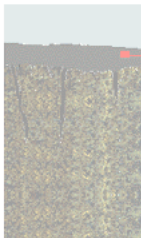


Extractos solubles de los lodos



Contaminación secundaria

1ª Etapa. Desección parcial, oxidación y disolución.



En la superficie del suelo se forman eflorescencias salinas

Evaporación, concentración de la disolución y precipitación de las sales.



1. EL ACCIDENTE

2. LA CONTAMINACION

secundaria, etapa 1, eflorescencias

3. LA RECUPERACION





1. EL ACCIDENTE

2. LA CONTAMINACION

secundaria, etapa 1, eflorescencias

3. LA RECUPERACION

Bianchita
Beaverita
Hexaedrita



1. EL ACCIDENTE

2. LA CONTAMINACION

secundaria, etapa 1, eflorescencias

3. LA RECUPERACION





1. EL ACCIDENTE
2. LA CONTAMINACION
inicial y secundaria
3. LA RECUPERACION



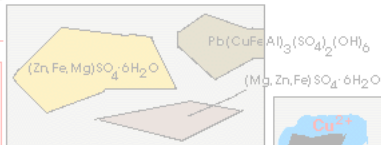
4 Mayo



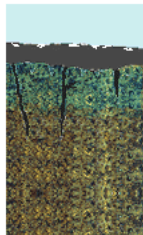
20 Mayo



Periodo seco



Periodo húmedo

**Contaminación secundaria**

2ª Etapa. Contaminación. Lluvias.

Al llegar las lluvias se produce la infiltración de los metales pesados procedentes de la oxidación de los lodos.

2.1 Las sales de la superficie de los lodos se disuelven por las gotas de lluvia y se infiltran en el suelo



1. EL ACCIDENTE
2. LA CONTAMINACION
secundaria, etapa 2, disolución
3. LA RECUPERACION





Periodo
húmedo



Contaminación secundaria

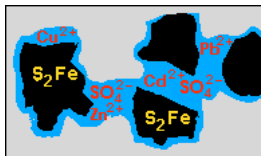
2ª Etapa. Contaminación.

Al llegar las lluvias se produce la infiltración de los metales pesados procedentes de la oxidación de los lodos.

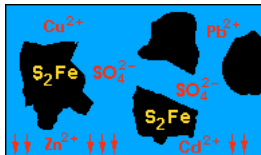
2.1 Las sales de la superficie de los lodos se disuelven por las gotas de lluvia y se infiltran en el suelo.

2.2 Las sales disueltas retenidas en los microporos de los lodos

son arrastradas al interior del suelo



→
Lluvias

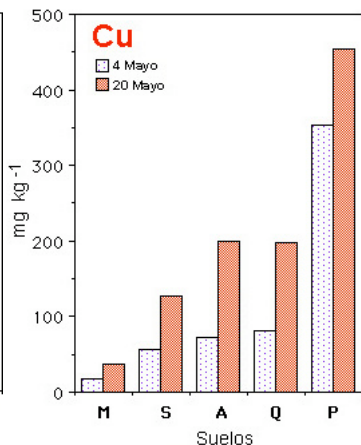
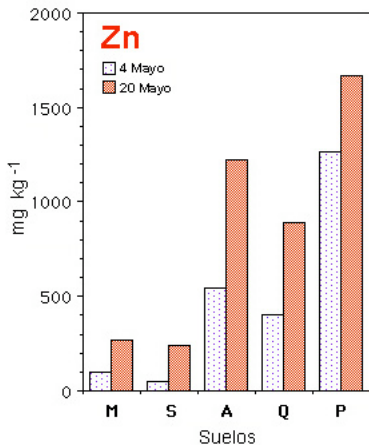


1. EL ACCIDENTE

2. LA CONTAMINACION

evolución contaminación suelos

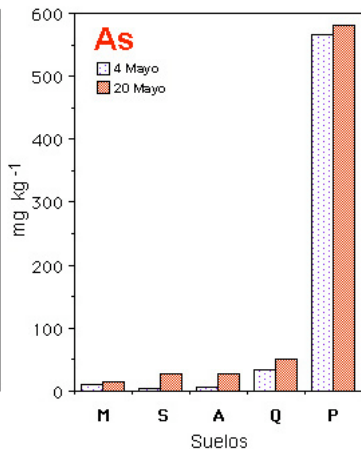
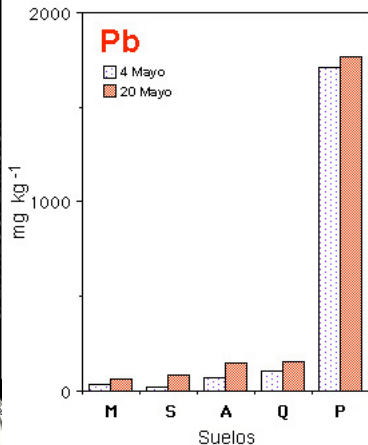
3. LA RECUPERACION



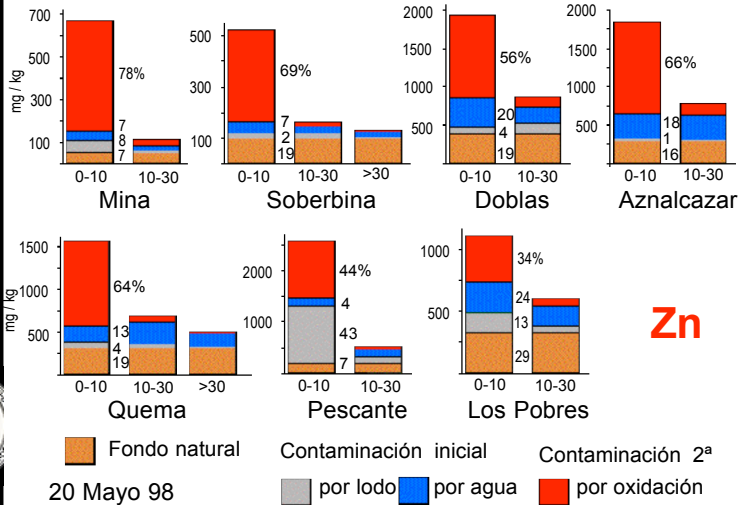
Suelos horiz. 0-10cm



1. EL ACCIDENTE
2. LA CONTAMINACION
secundaria, etapa 2, infiltración
3. LA RECUPERACION

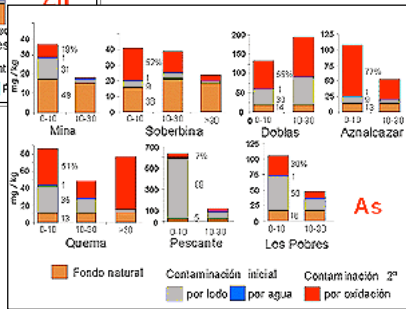
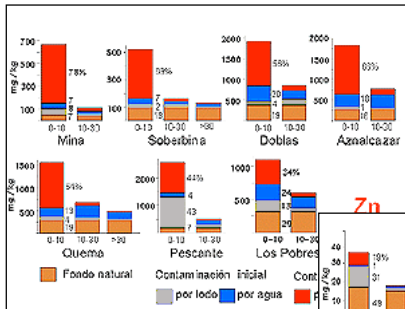


Suelos horiz. 0-10cm





1. EL ACCIDENTE
2. LA CONTAMINACION
contam. 1ª y 2ª del Zn y del As
3. LA RECUPERACION





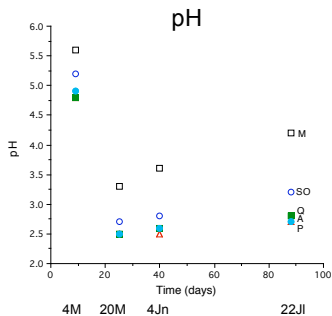
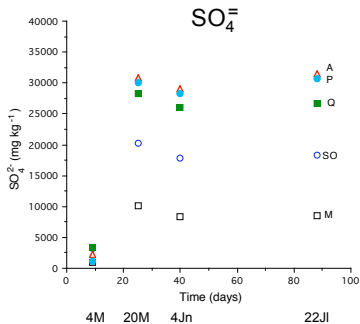
1. EL ACCIDENTE
2. LA CONTAMINACION
evolución de la contaminación
3. LA RECUPERACION

Evolución de la contaminación en el tiempo

- 4 Mayo
- 20 Mayo
- 4 Junio
- 22 Julio



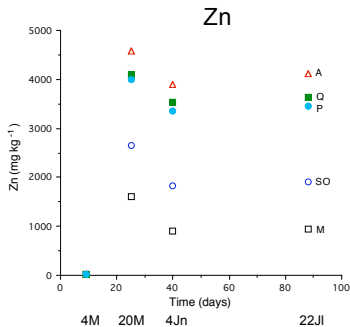
1. EL ACCIDENTE
2. LA CONTAMINACION
extractos solubles lodos
3. LA RECUPERACION



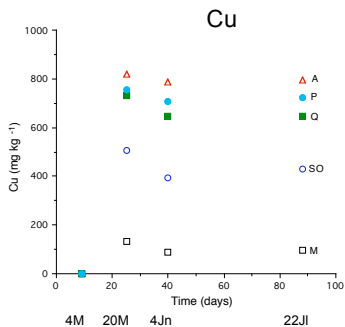
Extractos solubles de los lodos



1. EL ACCIDENTE
2. LA CONTAMINACION
extractos solubles lodos
3. LA RECUPERACION



Esfalerita: ZnS

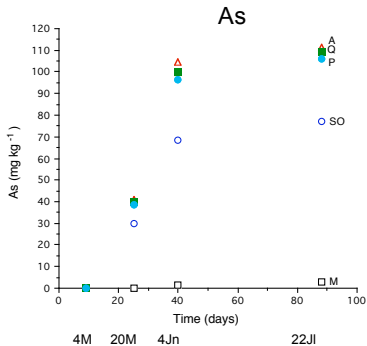


Calcopirita: CuFeS₂

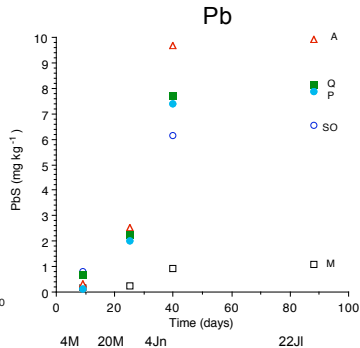
Extractos solubles de los lodos



1. EL ACCIDENTE
2. LA CONTAMINACION
extractos solubles lodos
3. LA RECUPERACION



Arsenopirita: AsFeS_2



Galena: PbS

Extractos solubles de los lodos

1. EL ACCIDENTE

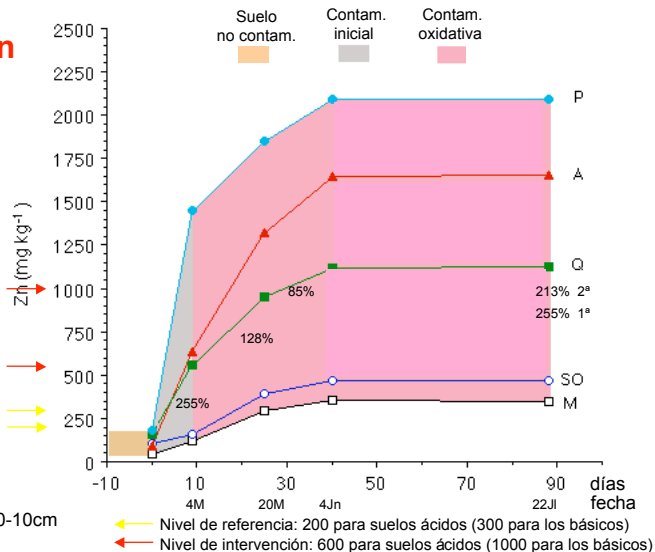
2. LA CONTAMINACION

evolución contaminación suelos

3. LA RECUPERACION

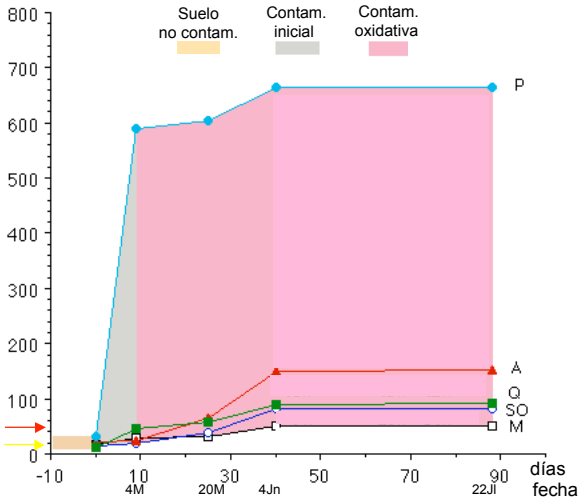


Zn





As

As (mg Kg^{-1})

suelos
horiz. 0-10cm

← Nivel de referencia: 20 para suelos agrícolas
 ← Nivel de intervención: 50 para suelos agrícolas

1. EL ACCIDENTE

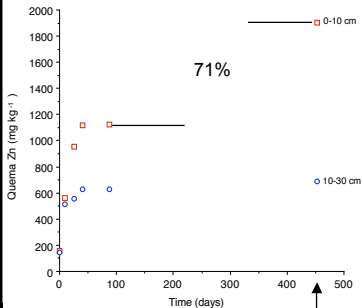
2. LA CONTAMINACION

evolución contaminación suelos

3. LA RECUPERACION

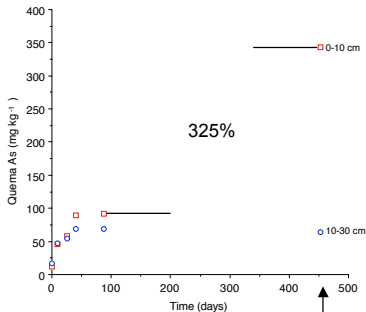


Zn



15 meses

As

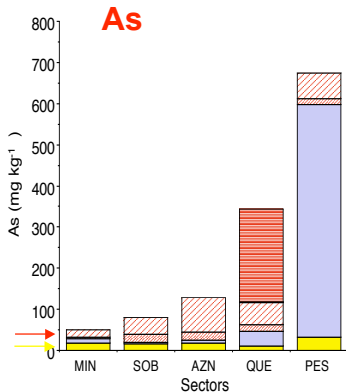
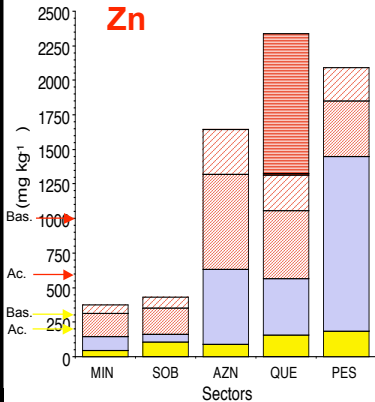


15 meses

Horiz. 0-10cm y de 10-30 del suelo del Quema

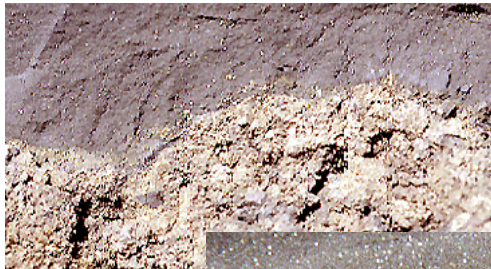


1. EL ACCIDENTE
2. LA CONTAMINACION
contam. 1ª y 2ª del Zn y del As
3. LA RECUPERACION





1. EL ACCIDENTE
2. LA CONTAMINACION
orla debida a oxidación secundaria
3. LA RECUPERACION



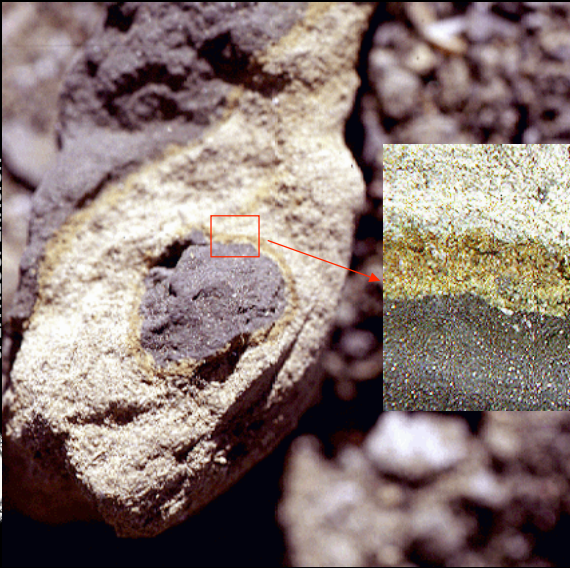
4/5/98



4/6/98



1. EL ACCIDENTE
2. LA CONTAMINACION
2ª, etapa 2, oxidación e infiltración
3. LA RECUPERACION



1. EL ACCIDENTE

2. LA CONTAMINACION

contaminación orla: As

3. LA RECUPERACION

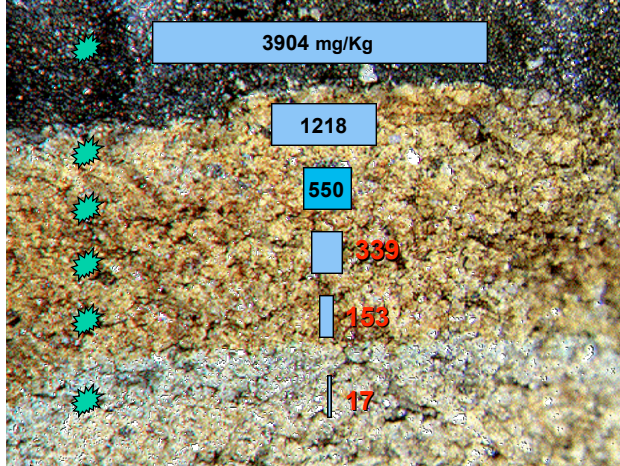


lodo
>10 cm

orla
6 mm

suelo

suelo



10 cm



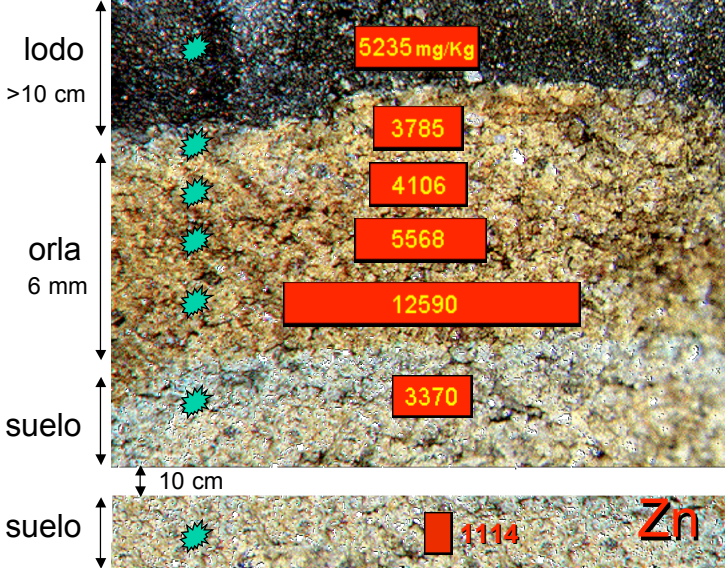


1. EL ACCIDENTE

2. LA CONTAMINACION

contaminación orla infiltración: Zn

3. LA RECUPERACION



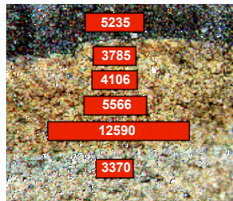


1. EL ACCIDENTE

2. LA CONTAMINACION

contaminación orla: muy móviles

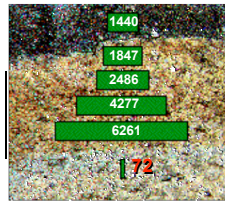
3. LA RECUPERACION



Zn



Cd

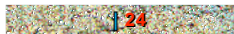


Cu

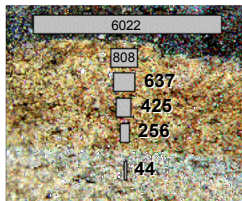
mg/Kg



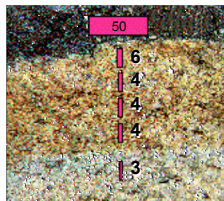
1. EL ACCIDENTE
2. LA CONTAMINACION
contaminación orla: poco móviles
3. LA RECUPERACION



As



Pb



Te

mg/Kg

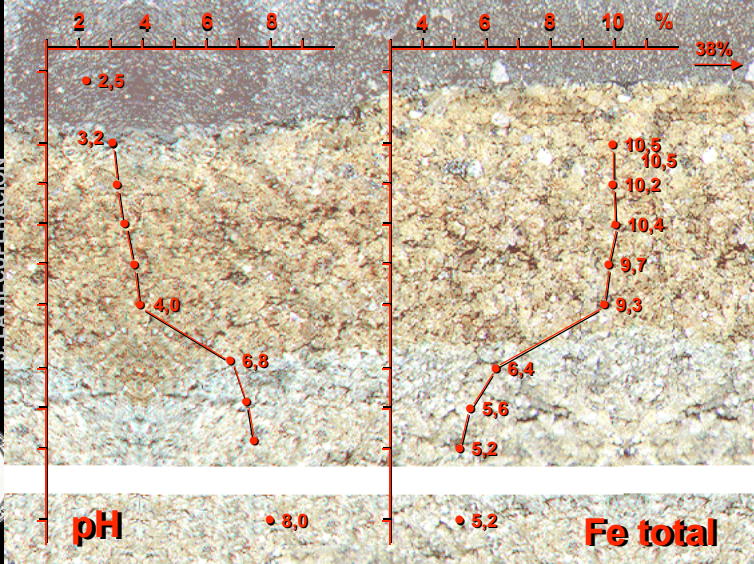


1. EL ACCIDENTE

2. LA CONTAMINACION

contaminación orla: pH y Fe

3. LA RECUPERACION



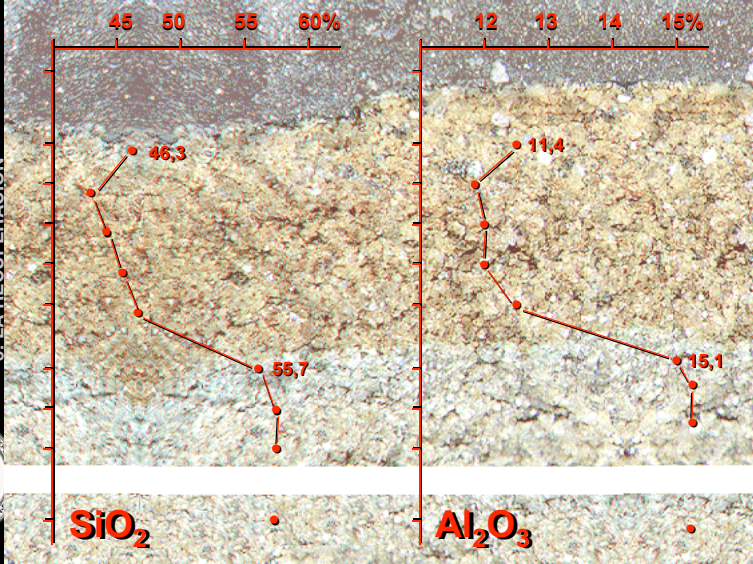


1. EL ACCIDENTE

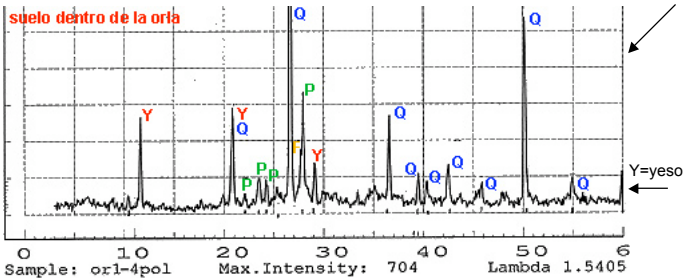
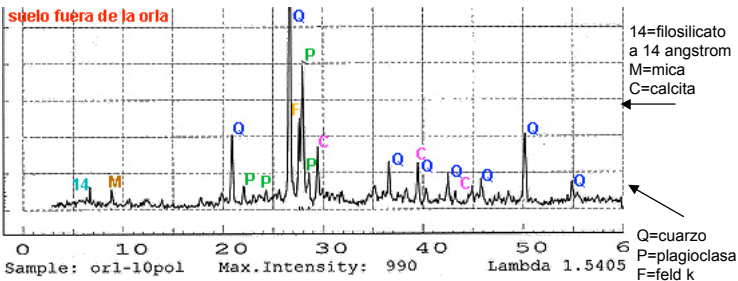
2. LA CONTAMINACION

contaminación orla: SiO_2 y Al_2O_3

3. LA RECUPERACION

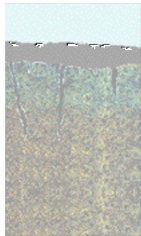


1. EL ACCIDENTE
2. LA CONTAMINACION
contaminación orla: alterac. mineral
3. LA RECUPERACION





Periodo
húmedo



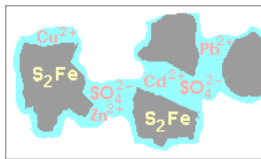
Contaminación secundaria

2ª Etapa. Contaminación.

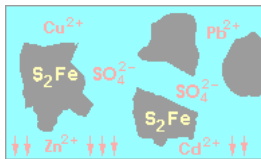
Al llegar las lluvias se produce la infiltración de los metales pesados procedentes de la oxidación de los lodos.

2.1 Las sales de la superficie de los lodos se disuelven por las gotas de lluvia y se infiltran en el suelo.

2.2 Las sales disueltas retenidas en los microporos de los lodos son arrastradas al interior del suelo



Iluvias



2.3 Se forman sales en el interior del suelo



1. EL ACCIDENTE
2. LA CONTAMINACION
secundaria, etapa 1, sales en suelo
3. LA RECUPERACION



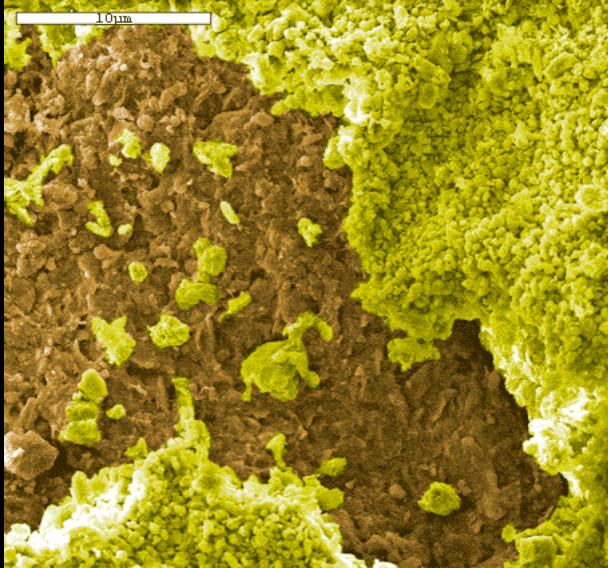


1. EL ACCIDENTE

2. LA CONTAMINACION

secundaria, etapa 1, sales en suelo

3. LA RECUPERACION



sales



suelo

SEM



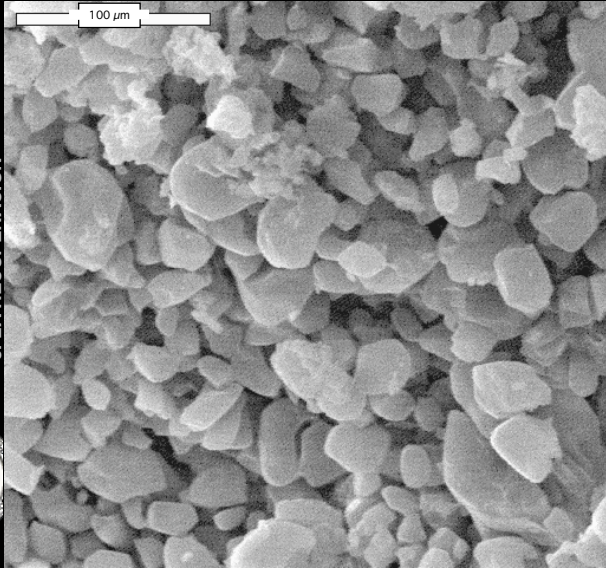
1. EL ACCIDENTE

2. LA CONTAMINACION

secundaria, etapa 1, sales en suelo

3. LA RECUPERACION

100 μm

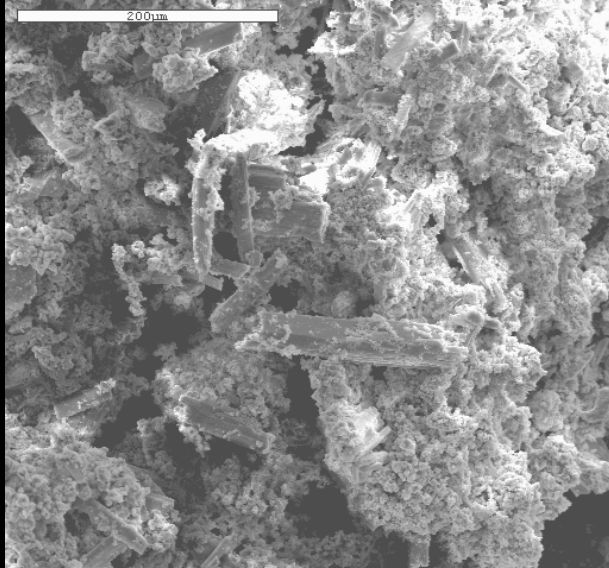


$\text{SO}_4=34\%$
 $\text{FeO}=62\%$
 $\text{ZnO}=2\%$

SEM



1. EL ACCIDENTE
2. LA CONTAMINACION
secundaria, etapa 1, sales en suelo
3. LA RECUPERACION



Masa:

$\text{SO}_4=34\%$

$\text{FeO}=62\%$

$\text{ZnO}=2\%$

listones

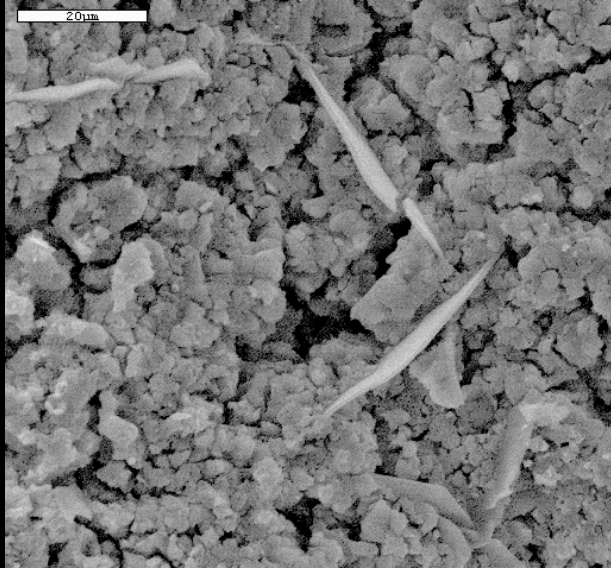
$\text{SO}_4=56\%$

$\text{CaO}=38\%$

SEM



1. EL ACCIDENTE
2. LA CONTAMINACION
secundaria, etapa 1, sales en suelo
3. LA RECUPERACION



Masa:

SO_4
Fe

laminas

SO_4
Al

SEM



1. EL ACCIDENTE
2. LA CONTAMINACION
la especiación de los metales
3. LA RECUPERACION

Metales totales frente a especiación

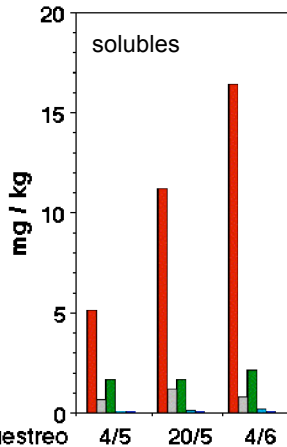
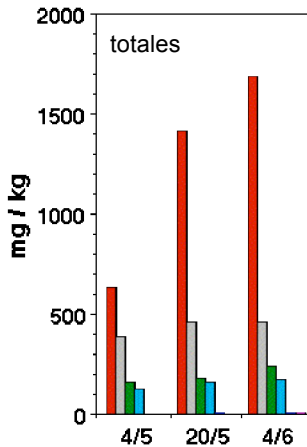


1. EL ACCIDENTE

2. LA CONTAMINACION

fracción soluble de los contaminantes

3. LA RECUPERACION



total Zn
total Pb
total Cu
total As
total Cd
total Tl

0,9%
0,7%
1,1%

soluble Zn
soluble Pb
soluble Cu
soluble As
soluble Cd
soluble Tl



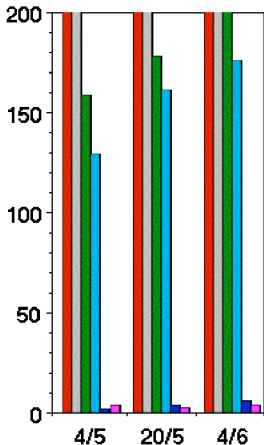
1. EL ACCIDENTE

2. LA CONTAMINACION

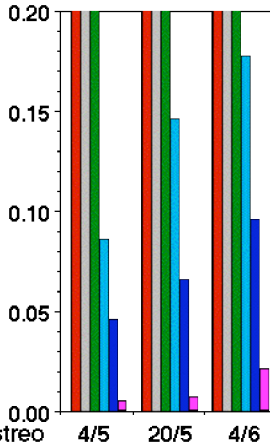
fracción soluble de los contaminantes

3. LA RECUPERACION

mg / kg



mg / kg



total Zn
total Pb
total Cu
total As
total Cd
total Tl

0,2%

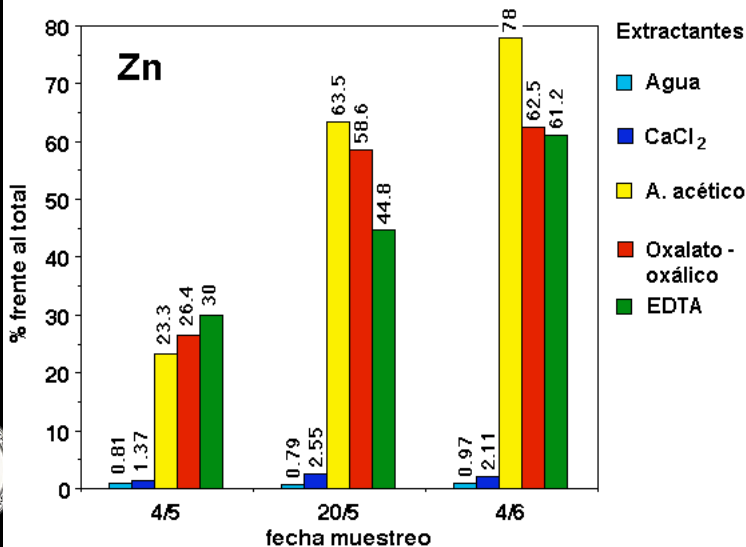
2%

3%

soluble Zn
soluble Pb
soluble Cu
soluble As
soluble Cd
soluble Tl



1. EL ACCIDENTE
2. LA CONTAMINACION
especiación del Zn
3. LA RECUPERACION





1. EL ACCIDENTE

2. LA CONTAMINACION

especiación de los contaminantes

3. LA RECUPERACION

