

Aznalcóllar, hoy. La contaminación de los suelos 15 años después

Carlos Dorronsoro. Departamento de Edafología y Q. A. Universidad de Granada

con la colaboración de: J. Aguilar, E. Fernández, J. Fernández, I. García,
A. Iriarte, F. Martín, F. J. Martínez, I. Ortiz, A. Roca, M. Simón



Bien el vertido pirítico de Aznalcóllar constituye un caso insólito en España; un caso insólito por varios motivos:

1º por la extensión de la contaminación (fueron varios miles las ha afectadas directamente)

2º por su situación (cercanías al Parque Nacional de Doñana; se afectó el Parque Natural y quedó a las puertas del Parque Nacional), y

3º por la sensibilidad que tuvo la sociedad que arrastró a los políticos y hubo una reacción inmediata de la comunidad científica para analizar la gravedad del problema.

y 4ª por ser la mayor remediación de suelos llevada a cabo en Europa.

Han sido muchos los equipos que han trabajado en las consecuencias de este vertido bajo muy diversos aspectos, como la hidrología, la botánica, la zoología,.... Concretamente en los suelos han trabajado varios grupos, por ejemplo a destacar la labor realizada por un equipo gallego dirigido por los doctores Macías y Calvo, también han realizado importantes contribuciones investigadores varias universidades, sin olvidar a los investigadores del CSIC.

Por lo que me voy a referir sólo a datos propios. Les voy a exponer hoy algunos de los resultados obtenidos por el Dpto de Edafología y Química Agrícola de la Universidad de Granada, en el seguimiento realizado sobre los suelos desde los primeros días del vertido hasta la actualidad y de las medidas remediadoras que adoptó la Junta de Andalucía en base a los resultados que iban obteniendo de todos estos equipos. Intentaré mostrarles como está la situación a día de hoy.

Aznalcóllar, hoy. La contaminación de los suelos 15 años después

Carlos Dorronsoro. Departamento de Edafología y Q. A. Universidad de Granada

con la colaboración de: J. Aguilar, E. Fernández, J. Fernández, I. García,
A. Iriarte, F. Martín, F. J. Martínez, I. Ortiz, A. Roca, M. Simón

Aznalcóllar, hoy.
1. El accidente.

1. El accidente

Esta charla la vamos a estructurar en cinco apartados. Empezaremos recordando como fue el accidente minero.

Aznalcóllar, hoy. La contaminación de los suelos 15 años después

Carlos Dorronsoro. Departamento de Edafología y Q. A. Universidad de Granada

con la colaboración de: J. Aguilar, E. Fernández, J. Fernández, I. García,
A. Iriarte, F. Martín, F. J. Martínez, I. Ortiz, A. Roca, M. Simón

2. La contaminación de los suelos

Después pasaremos a considerar el impacto en los suelos

Aznalcóllar, hoy. La contaminación de los suelos 15 años después

Carlos Dorronsoro. Departamento de Edafología y Q. A. Universidad de Granada

con la colaboración de: J. Aguilar, E. Fernández, J. Fernández, I. García,
A. Iriarte, F. Martín, F. J. Martínez, I. Ortiz, A. Roca, M. Simón

3. Las medidas de remediación

En el tercer bloque hablaremos de las medidas de remediación que se llevaron a cabo.

Aznalcóllar, hoy. La contaminación de los suelos 15 años después

Carlos Dorronsoro. Departamento de Edafología y Q. A. Universidad de Granada

con la colaboración de: J. Aguilar, E. Fernández, J. Fernández, I. García,
A. Iriarte, F. Martín, F. J. Martínez, I. Ortiz, A. Roca, M. Simón

4. La evolución sin intervención

En un cuarto punto consideraremos que hubiese pasado en la zona si no se hubiese intervenido

Aznalcóllar, hoy. La contaminación de los suelos 15 años después

Carlos Dorronsoro. Departamento de Edafología y Q. A. Universidad de Granada

con la colaboración de: J. Aguilar, E. Fernández, J. Fernández, I. García,
A. Iriarte, F. Martín, F. J. Martínez, I. Ortiz, A. Roca, M. Simón

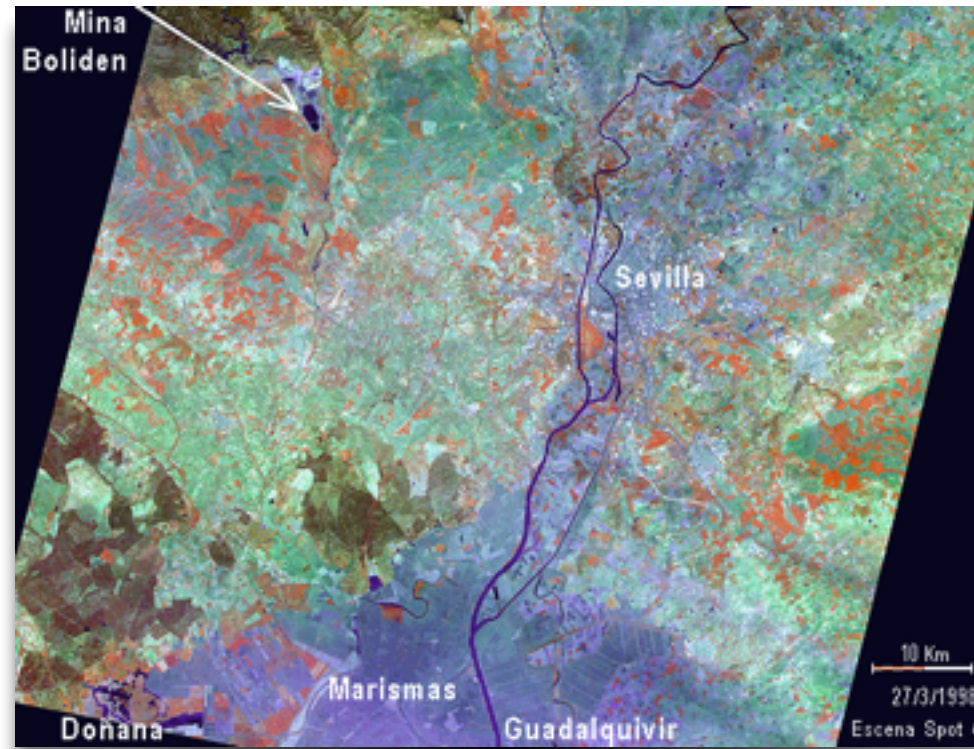
5. Una mirada al futuro

Y terminaremos aventurándonos en el previsible futuro de esta región.

• 1 El accidente

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro

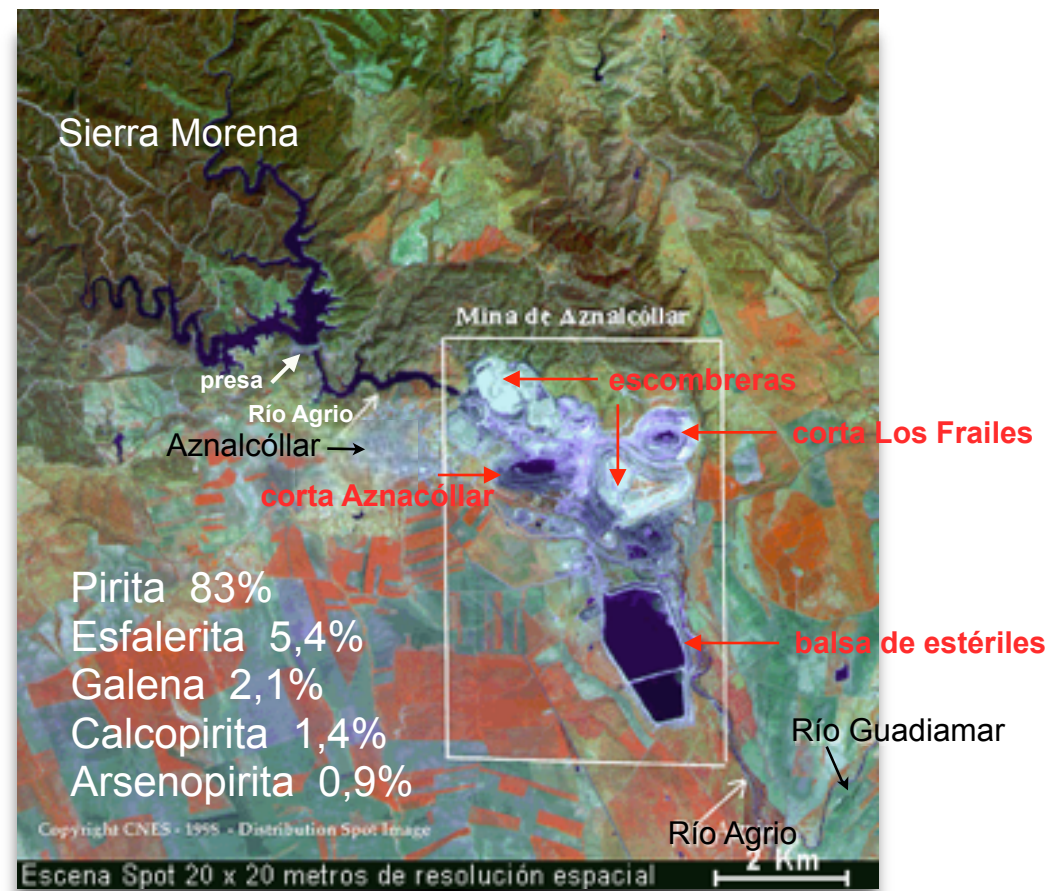


Con respecto al primer punto. El accidente.

Como es conocido, la mina de pirita que la empresa Boliden venía explotando en Aznalcóllar se encuentra situada a unos 30 km al oeste de Sevilla, a unos 40 al norte de las Marismas del Guadalquivir y a unos 50 km del Parque Nacional de Doñana.

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro



La mina pertenece a la Faja Pirítica Ibérica que recorre en dirección este-oeste el sur de la Península Ibérica y se encuentra situada justo en el límite entre el macizo de Sierra Morena y la Depresión del Guadalquivir.

En la imagen se observa en azul intenso la balsa de almacenamiento de estériles que fue la causante del vertido, de unos 2 km de longitud, situada junto al río Agrío, que es afluente del río Guadiamar.

La composición media de la mina es:

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro

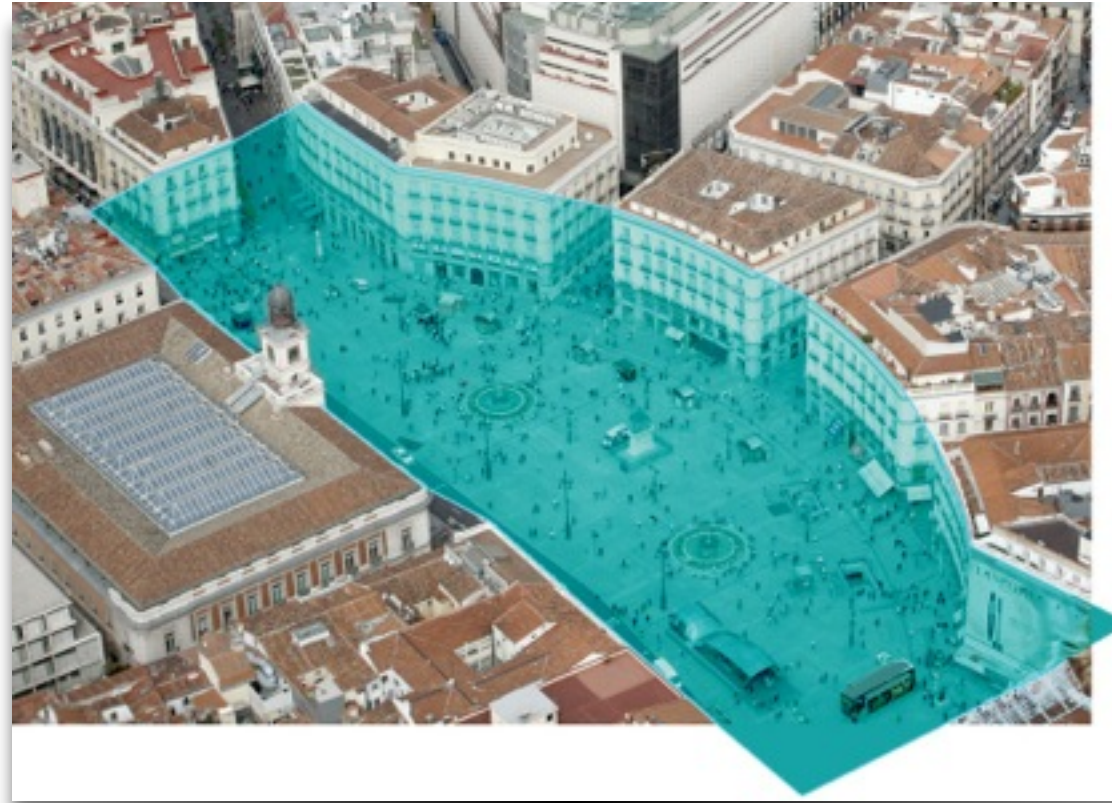


Como es sabido, en la noche del 25/abril/1998, se produce la rotura de una de las paredes de la balsa que retenía los estériles con unas altas concentraciones de As y de metales pesados (del orden de algunos gramos por kg).

Como resultado de la rotura se produce un vertido de unos 5 hectómetros cúbicos (de los cuales aproximadamente 4 fueron de aguas y 1 de lodos). 5 millones de m³ es una cifra impresionante, pero difícil de imaginar, podemos hacernos una idea si pensamos que ese volumen llenaría cinco estadios Santiago Bernabeu.

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente
2. La contaminación
3. La remediación
4. La no intervención
5. El futuro



O si la comparamos al volumen de la Puerta del Sol de Madrid ...

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente
2. La contaminación
3. La remediación
4. La no intervención
5. El futuro



en este caso el volumen del vertido equivaldría a una 23 veces el volumen de la Puerta del Sol de Madrid.

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente
2. La contaminación
3. La remediación
4. La no intervención
5. El futuro

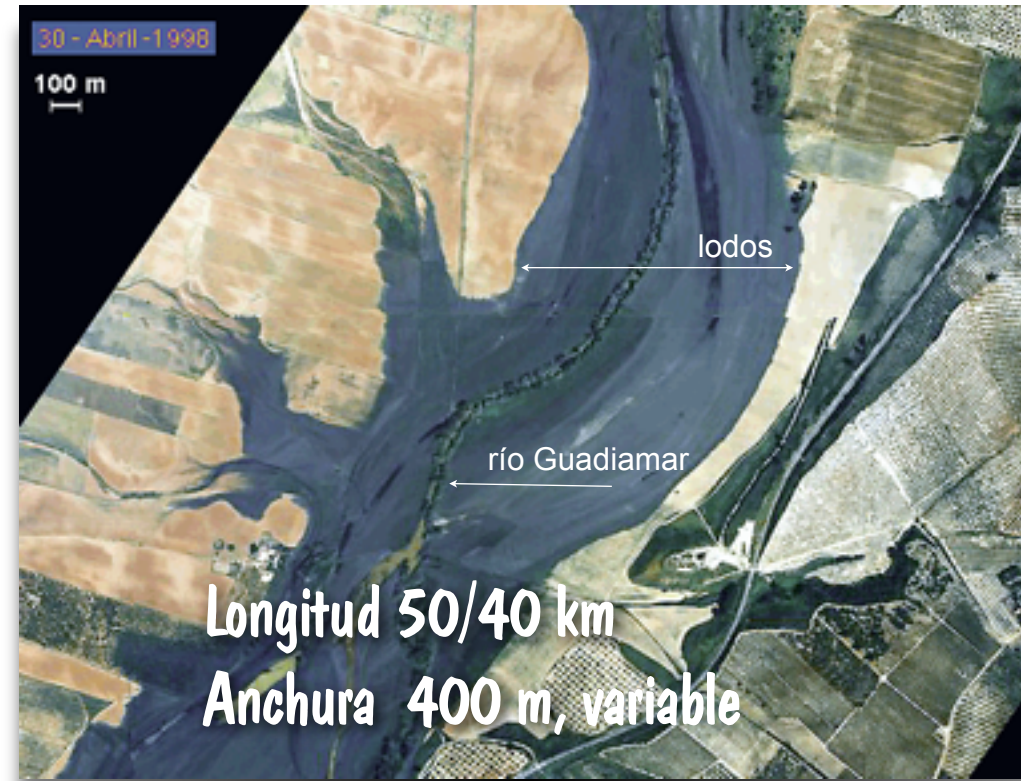


Esta contaminación se vierte sobre el cauce y ribera de los ríos Agrio y Guadiamar afectando a una superficie de unas 4.400 ha, principalmente de terrenos agrícolas.

Siguiendo nuestro símil la Puerta del Sol tiene un área de casi una hectárea.

Aznalcóllar, hoy.

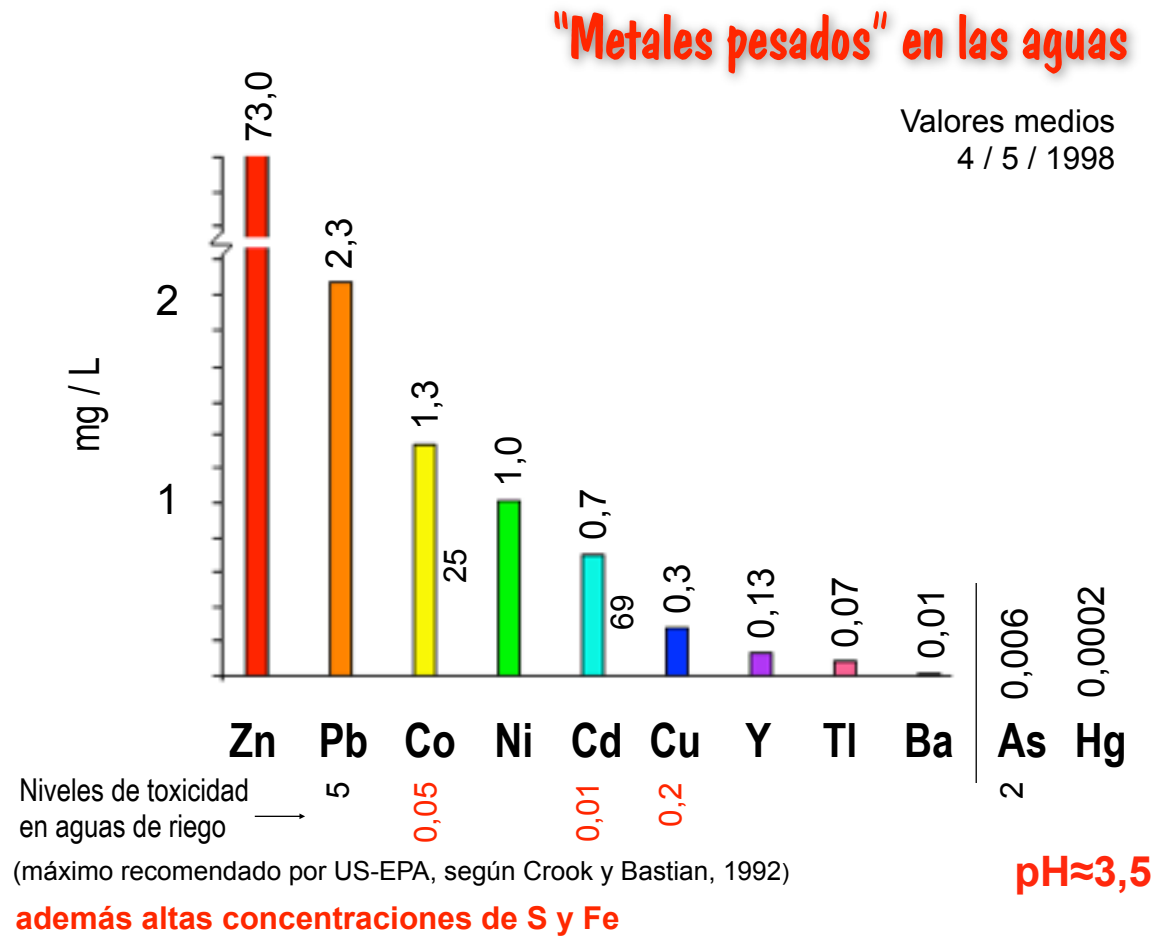
1. El accidente
2. La contaminación
3. La remediación
4. La no intervención
5. El futuro



El vertido se distribuye por el cauce y la ribera del río Agrío primero y luego del Guadiamar, **alcanzando las aguas** unos 50 km y los lodos 40. Con una anchura media de unos 400 metros, pero muy variable, dependiendo de la microtopografía.

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro



En cuanto a la composición del vertido, las aguas llevaban importantes cantidades de metales disueltos, fundamentalmente Zn, con 73 mg/L.

A destacar la concentración de un metal tan tóxico como es el Cd que se encontraba en una concentración que rebasaba en casi 70 veces los límites permitidos para el agua de riego.

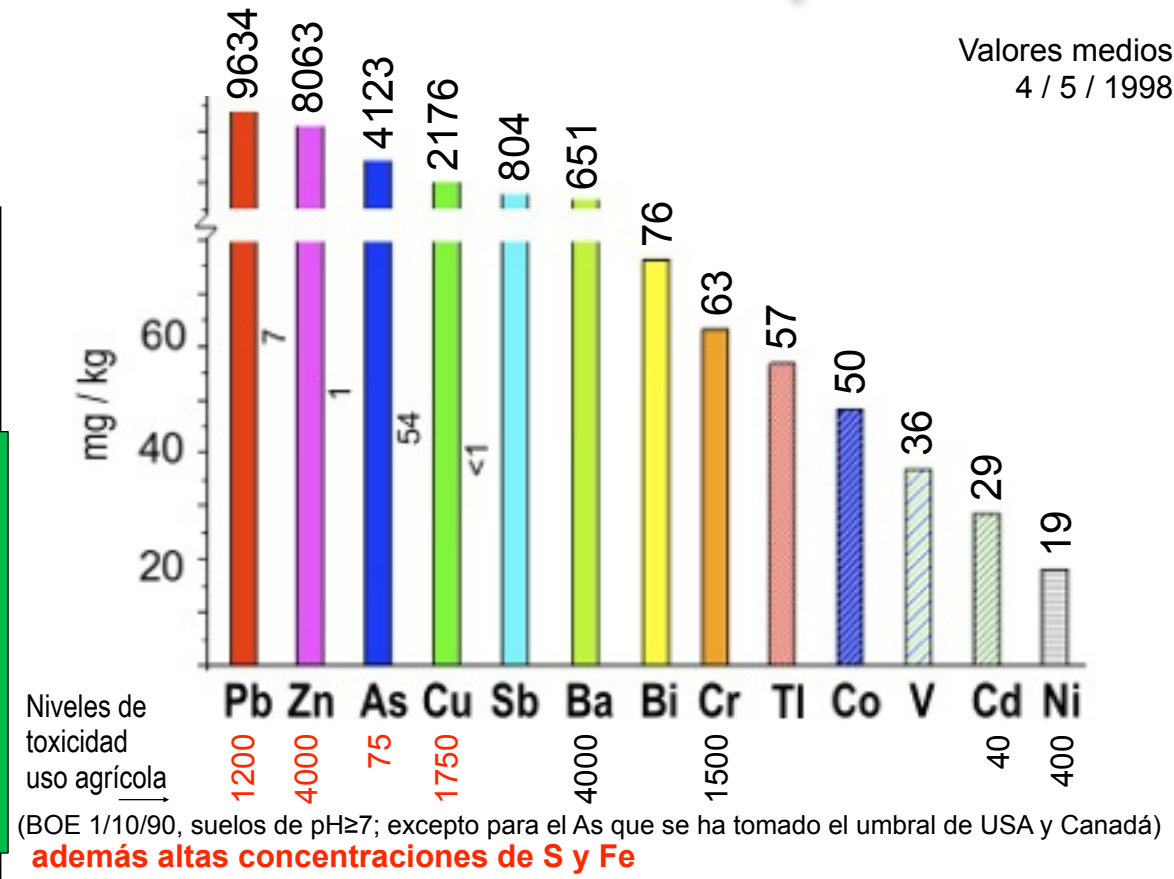
Importante también señalar el pH, fuertemente ácido, alrededor de 3,5.

Y en el lado positivo, destacar la ausencia en las aguas de dos elementos tan peligrosos como el As y el Hg.

"Metales pesados" en los lodos

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro



Las concentraciones de los lodos, como es lógico, eran mucho más altas. Especialmente para el Pb, Zn (del orden de 9 mil y 8 mil mg/kg), concentraciones también muy importantes para As y Cu (4 mil y 2 mil) (el As, superaba en 54 veces el nivel máximo permitido para la utilización de un lodo para fines agrícolas); y menores concentraciones para Sb, Ba, y menores aún para otros metales como Bi, Cr, Tl, Co, V, Cd y Ni.

• 2 Contaminación del suelo

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro

fechas de muestreo

7 perfiles:
a los 10, 25, 40 y 90 días

100 puntos:
1998, 1999, 2001, 2004, 2009, 2010 y 2013
a tres prof.: 0-10, 10-30, 30-50 cm



Bien, esas aguas y esos lodos cayeron sobre los suelos y los contaminaron. Este es el aspecto que presentaba la zona a los 10 días del vertido, los suelos se encontraban recubiertos de una capa de lodos como si tuviesen una coraza metálica **de unos 8 cm de espesor que los fosilizaba**.

Para evaluar el impacto se muestrearon los suelos en distintas fechas.

En un principio se seleccionaron 7 puntos representativos, a los 10, 25, 40 y 90 días del vertido, después pasamos a establecer una red de muestreo con 100 puntos repartidos aleatoriamente por la toda la zona contaminada, al final del año 1998, en 1999, 2001, 2004, 2009, 2010 y 2013. A tres profundidades. Lógicamente el hor superior 0-10 fue donde se presentaron las mayores concentraciones y es por ello al que nos vamos a referir exclusivamente en esta charla.

Características de los suelos

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

Textura, variable: de francoarenosa a arcillolimosa

Materia orgánica: 0,9 - 2,9%

Gravas, muy variable: 0 - 43%

pH: 7,2 - 8,1

CaCO₃: 0 - 20 %

Capacidad cambio cationes: 8-31 cmol_c kg⁻¹

Fe: 3-6%

Tipología:

Fluvisoles y Regosoles, calcáricos y eútricos (FAO,2006)

Xerofluvents y Xerorthents, típicos (Soil Taxonomy, 2007)

El impacto sobre los suelos va a depender en gran medida de las características de estos, ya que según sean estas los suelos van a poseer un poder de autodepuración muy variable.

Frente a este vertido ácido los suelos de la cuenca presentaban muy buenas características en lo referente al pH (siempre neutro o básico, nunca ácido) y al contenido en carbonatos para gran número de ellos y moderadas prestaciones para los contenidos en materia orgánica, capacidad de cambio de cationes y para el Fe.

Se trataba de los suelos típicos de la riberas de los ríos, suelos muy poco evolucionados en todos los casos.

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro



Suelos sin carbonatos, arenosos

Suelos con carbonatos, arenosos

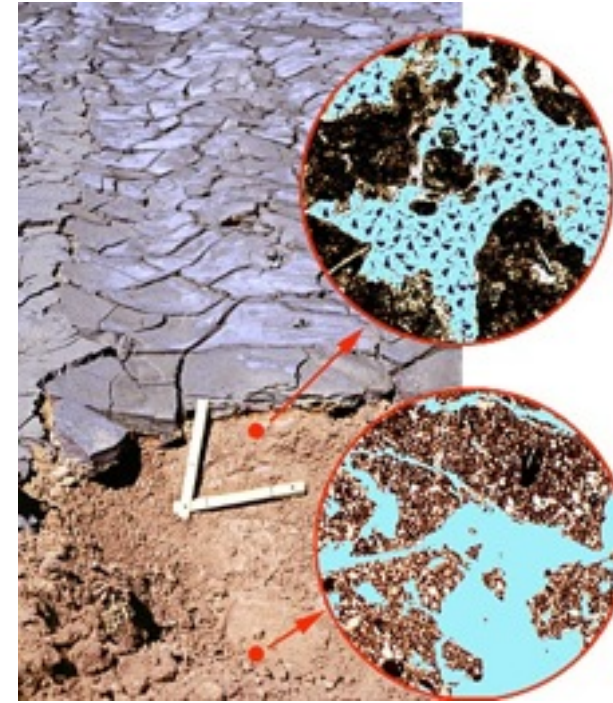
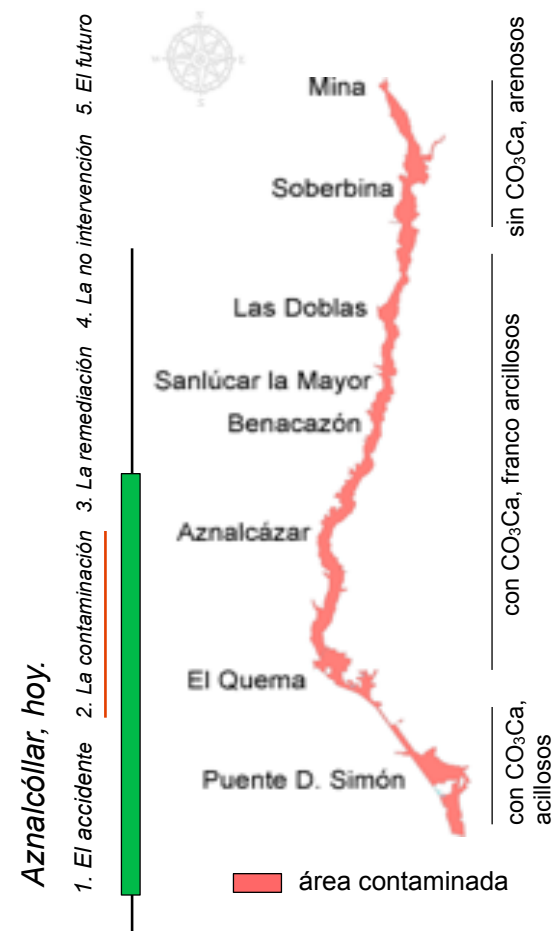
Suelos con carbonatos, acillosos-limosos

En líneas generales, en la distribución de estos suelos se pueden diferenciar en tres zonas:

- en la parte alta de la cuenca, junto a la mina, predominan los suelos sin carbonatos y de textura arenosa, por tanto son los suelos más sensibles a la contaminación, es pues la zona más frágil,
- en la zona media, están ya presentes los carbonatos, pero siguen presentando una textura desfavorable,
- finalmente, en la parte baja de la cuenca, se encuentran los suelos con mayor poder de autodepuración: con carbonatos y de texturas finas.

Frente a la contaminación, **los suelos actuaron protegiendo al medio ambiente bajo dos procesos** distintos.

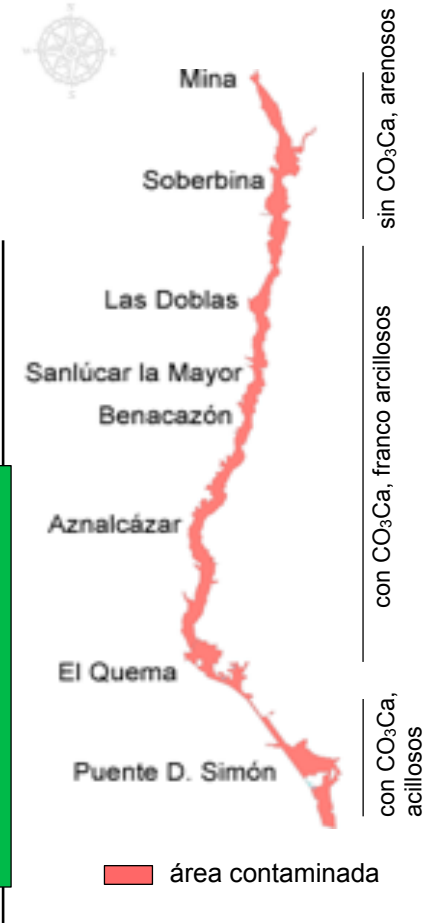
Efecto filtrante de los suelos



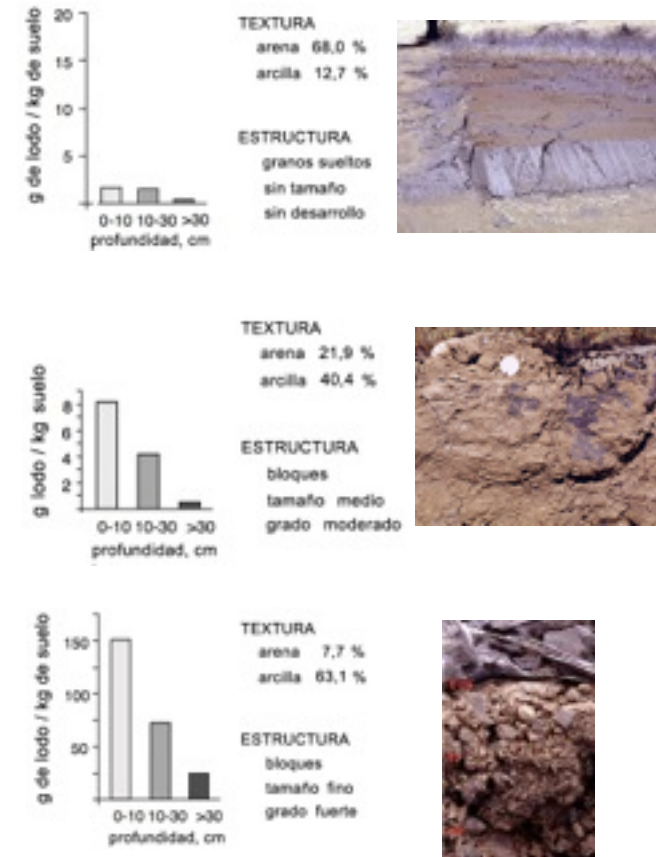
En primer lugar, los suelos actuaron como un sistema filtrante que retuvieron las partículas de los lodos arrastradas en las aguas, de tamaño limo, que representaba el tamaño dominante de las partículas de los lodos. La retención fue muy desigual, dependiendo fundamentalmente de las propiedades físicas de los suelos: concretamente, textura y estructura.

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro



Efecto filtrante de los suelos



Veamos el comportamiento de un suelo representativo de cada zona.

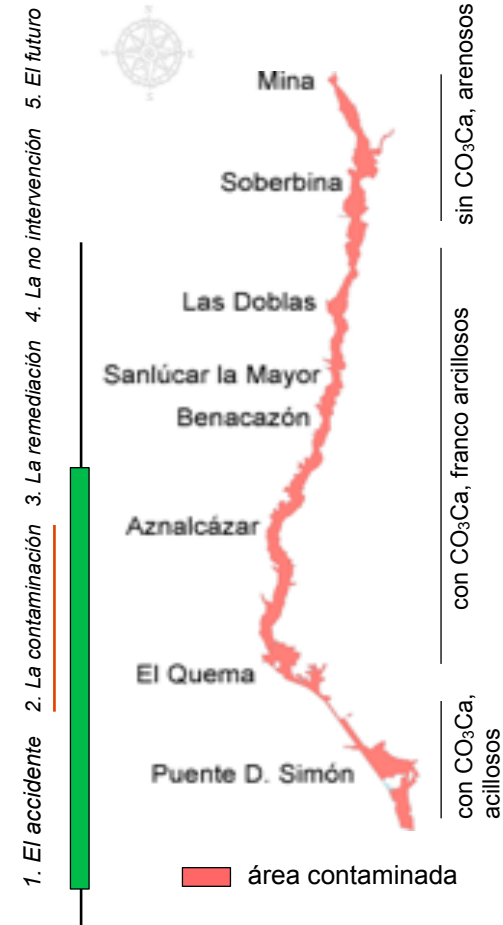
En los suelos arenosos, de la parte alta de la cuenca, con muy bajo grado de desarrollo de la estructura, al no existir grietas, los lodos apenas penetraron en los suelos y quedaron en gran medida depositados sobre la superficie. Pero las aguas ácidas atravesaron los suelos sin ser retenidas y pasaron a contaminar el subsuelo y muy posiblemente a los acuíferos de la zona.

En los suelos arcillosos de la parte baja de la cuenca, con un fuerte desarrollo de la estructura, los lodos penetraron con facilidad a través de las grietas estructurales y gran parte de ellos quedaron retenidos dentro del suelo hasta los 50 cm de profundidad. En cuanto a las aguas, encontraron gran dificultad para atravesar estos suelos de baja permeabilidad. Por tanto estos suelos bloquearon parte de la contaminación y de esta manera protegieron a los acuíferos.

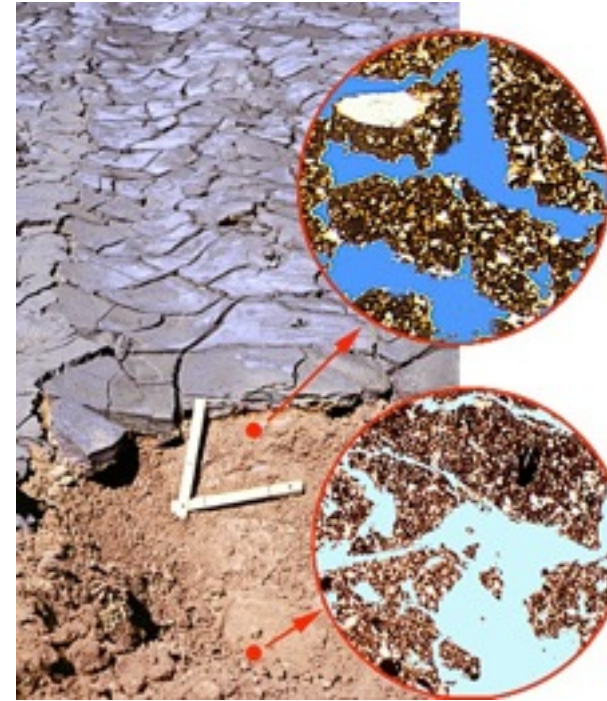
En los suelos de la cuenca media, moderadamente arcillosos y con un moderado grado de desarrollo estructural, tuviera un comportamiento intermedio entre los dos tipos descritos.

En definitiva la entrada de lodos en los suelos fue muy desigual (desde sólo unos gramos de lodo por kg en los suelos mas arenosos hasta más de 150 g/kg en los más arcillosos para el horizonte superficial).

Aznalcóllar, hoy.



Efecto depurador de los suelos



Por otra parte, los suelos actuaron también como un sistema depurador que retuvieron gran parte del As y de los metales pesados disueltos en las aguas. El poder de autodepuración fue muy desigual, dependiendo fundamentalmente de las propiedades fisicoquímicas de cada suelo, pero condicionadas estas por las propiedades físicas.

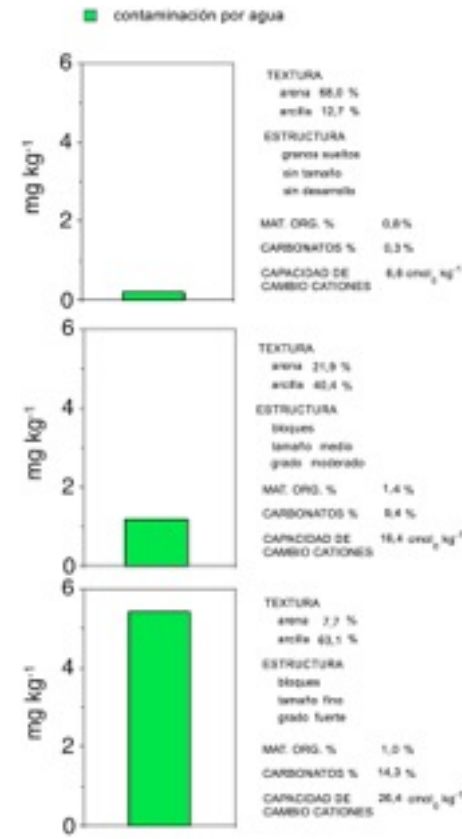
Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro



Efecto depurador de los suelos

Cd



En esta figura representamos la contaminación aportada por las aguas para uno de los metales pesados más tóxicos como es el Cd, en estos tres suelos representativos, con diferentes texturas.

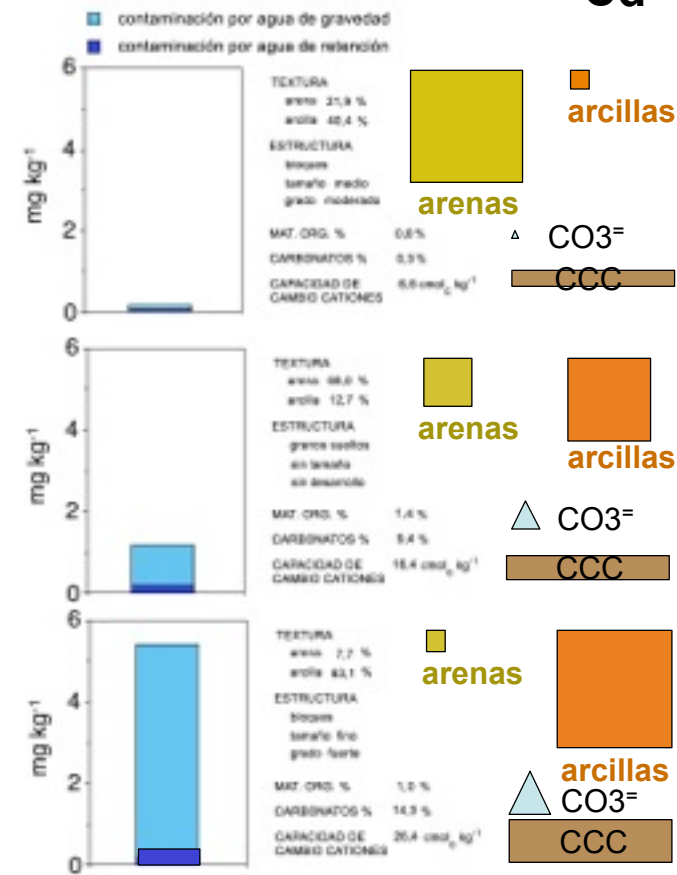
El efecto depurador fue muy bajo en los arenosos, moderado en los francos y muy alto en los arcillosos. Quiere esto decir que las aguas salieron hacia el subsuelo muy limpias de los suelos arcillosos y con concentraciones muy poco depuradas en los suelos arenosos.

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro



Efecto depurador de los suelos

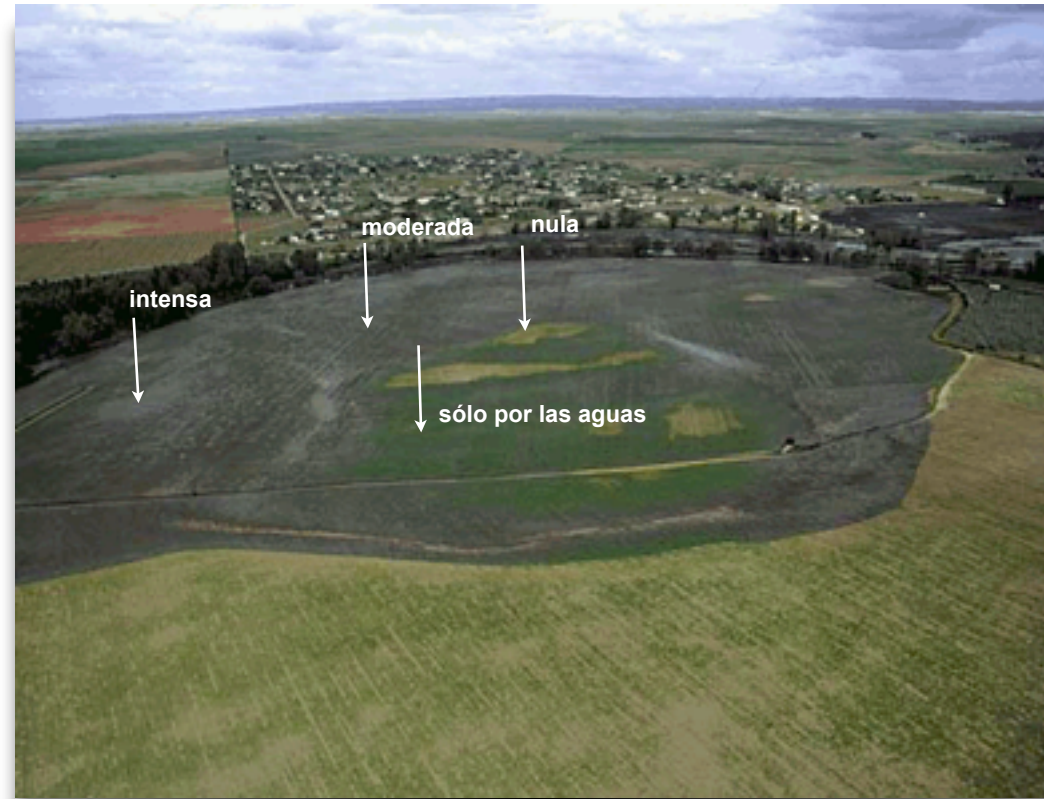


De esta contaminación una pequeña parte, la representada en azul oscuro, es la debida al agua que quedó retenida en los poros, pero un aspecto muy importante lo representa la contaminación (que en realidad podemos hablar de depuración) de la parte del agua representada en color celeste, esta la atribuimos al agua de gravedad que al infiltrarse la solución contaminante en el suelo ha ido purificándose, depositando (por adsorción y precipitación, principalmente) los elementos contaminantes y dejando percolar el agua mucho más limpia hacia los niveles freáticos.

El efecto depurador aumenta con los incrementos en arcilla pero condicionados por su capacidad de cambio catiónico y también regulada por el contenido en carbonatos.

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente
2. La contaminación
3. La remediación
4. La no intervención
5. El futuro



Además de las características de los suelos, la contaminación quedó muy influenciada por la microtopografía de la cuenca. En muy pocos metros la entrada de la contaminación fue muy desigual.

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente
2. La contaminación
3. La remediación
4. La no intervención
5. El futuro

suelos contaminados



suelos no contaminados

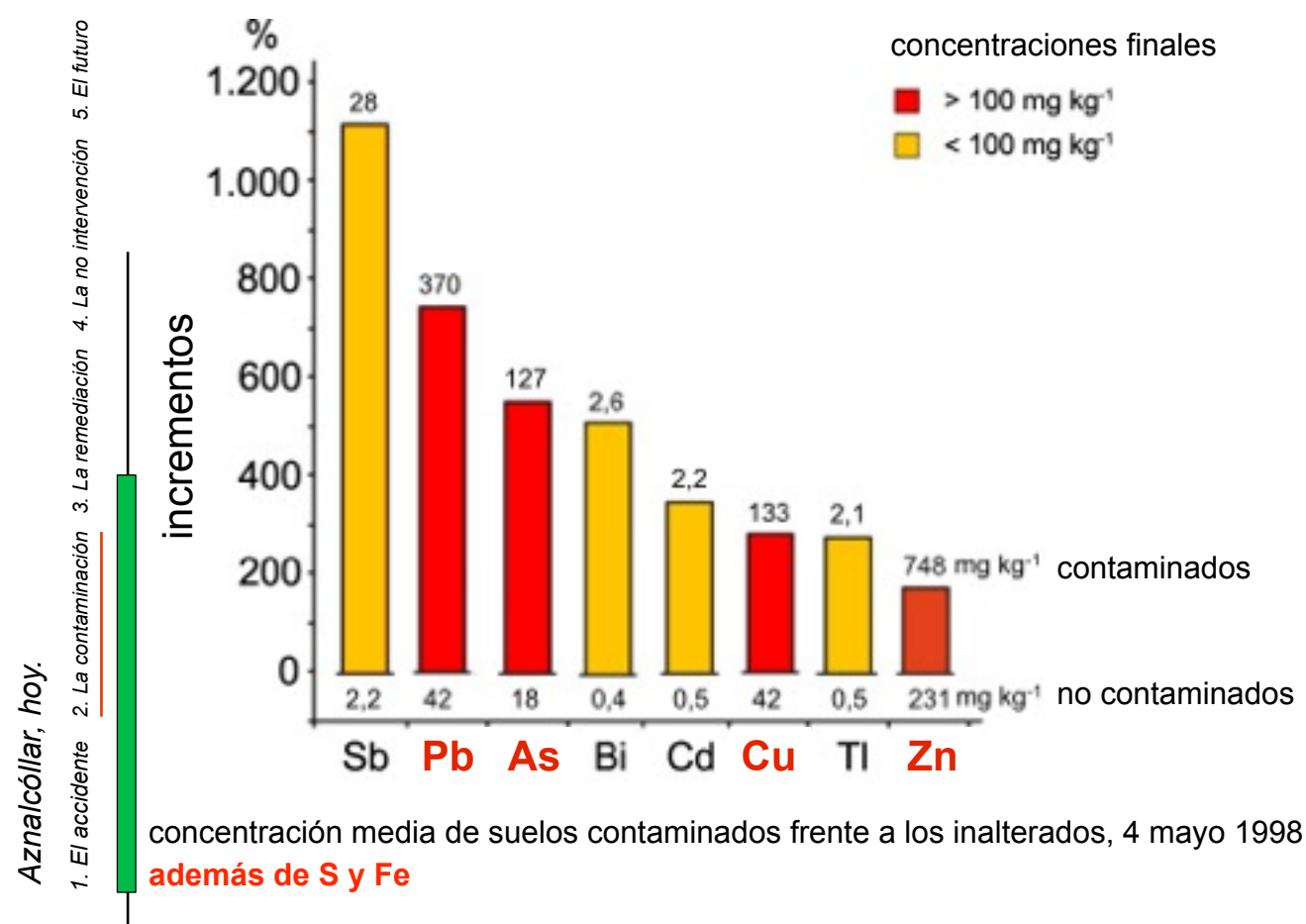
mg kg ⁻¹				mg kg ⁻¹					
	Máximo	Mínimo	Media	DE		Máximo	Mínimo	Media	DE
Hn	1050,0	470,6	691,9	172,8	Cd	5,7	0,4	2,2	1,8
Zn	2235,2	144,6	747,9	705,7	Ni	40,4	17,4	29,1	7,5
Pb	1785,5	60,0	370,4	627,6	Sn	4,8	0,0	1,0	1,8
Cu	400,8	33,8	132,8	124,2	V	22,2	12,5	18,3	3,6
As	603,7	29,0	127,0	211,1	Se	2,7	1,0	1,8	0,6
Rb	145,6	4,0	27,7	52,1	U	2,2	1,1	1,7	0,4
Ba	318,3	216,6	292,1	55,4	Th	19,5	9,1	13,9	4,1
V	127,7	75,6	94,7	17,4	So	16,5	6,2	10,9	3,3
Tl	8,9	0,5	2,1	3,1	Hg	0,6	0,2	0,4	0,1
Ce	103,2	45,1	69,5	18,8	Ho	2,1	0,0	0,7	0,7
Co	32,7	10,2	15,9	3,8	In	0,6	0,1	0,2	0,2
Bi	12,6	0,5	2,6	4,4	Sc	3,4	0,0	0,5	1,3

Tabla 6. Composición elemental de suelos afectados, entre 0-10 cm.
DE es la desviación estándar.

mg kg ⁻¹				mg kg ⁻¹					
	Máximo	Mínimo	Media	DE		Máximo	Mínimo	Media	DE
Hn	1250,0	365,9	845,5	275,6	Cd	0,9	0,0	0,5	0,4
Zn	376,1	45,8	230,8	123,1	Ni	47,7	14,0	32,1	12,3
Pb	74,6	22,0	41,8	16,4	Sn	3,4	0,0	0,8	1,3
Cu	66,9	17,0	42,2	18,8	V	30,1	8,3	16,1	7,7
As	31,5	11,5	18,1	6,5	Se	2,8	0,9	1,9	0,7
Rb	3,0	1,4	2,2	0,7	U	3,1	1,1	1,8	0,7
Ba	363,7	196,9	292,9	58,2	Th	16,8	4,1	11,7	4,4
V	132,5	45,1	100,6	31,3	So	17,6	4,1	11,9	5,4
Tl	0,6	0,2	0,5	0,1	Hg	0,5	0,2	0,4	0,1
Ce	99,9	39,1	69,5	25,4	Ho	0,8	0,0	0,2	0,3
Co	30,0	6,9	14,4	4,2	In	0,1	0,1	0,1	0,0
Bi	0,8	0,2	0,4	0,2	Sc	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabla 5. Composición elemental de suelos no afectados, entre 0-10 cm.
DE es la desviación estándar.

Para comprobar la contaminación de los suelos, con el ICP-Masas se analizaron las concentraciones de los suelos contaminados en los 7 sitios y se compararon con otros tantos suelos fuera del vertido. En esta imagen reproducimos los valores medios; de los veintitantos elementos químicos analizados ...

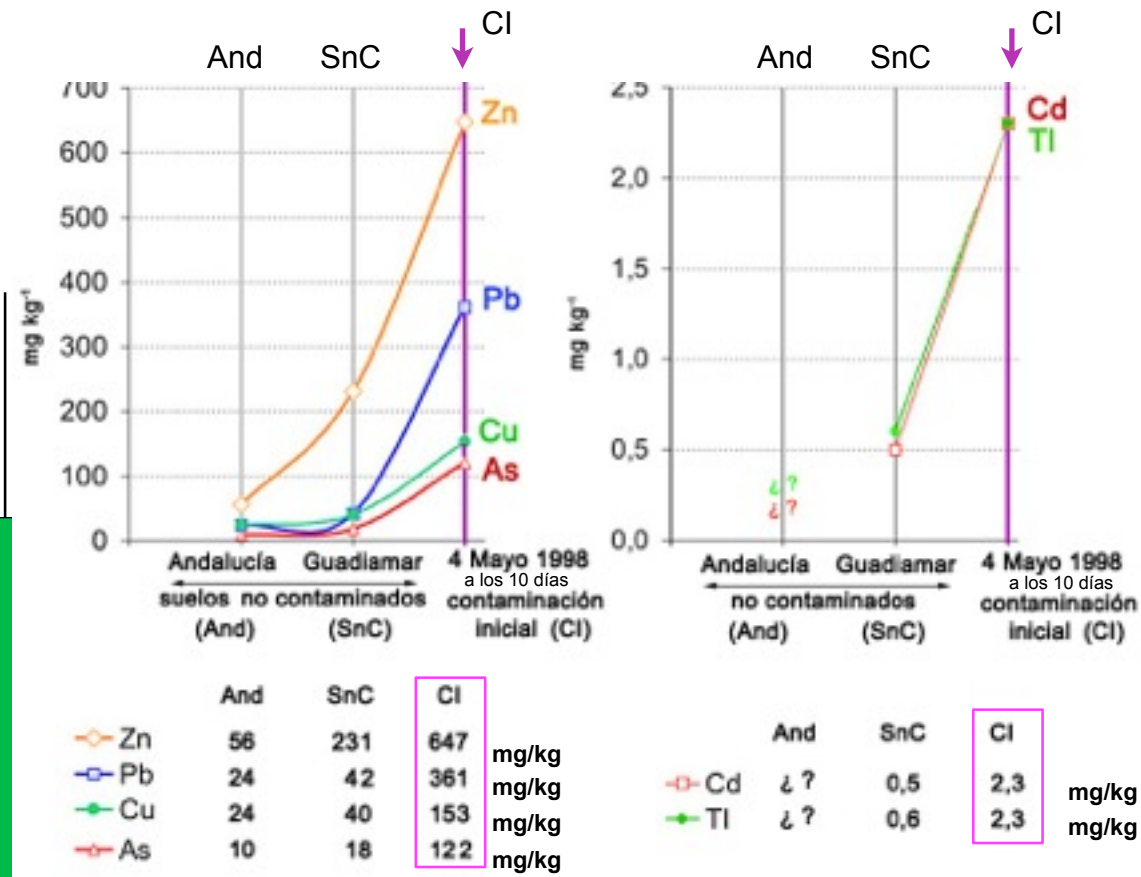


... fueron 8 los elementos traza que mostraron fuertes incrementos: antimonio, plomo, arsénico, bismuto, cadmio, cobre, talio y zinc. Podemos decir que la contaminación de los suelos en el vertido de Aznalcóllar se redujo a 8 elementos traza.

Al Bi no se le consideran hoy día efectos nocivos y el Sb tampoco es tenido en cuenta en la gran mayoría de las legislaciones europeas sobre suelos contaminados, podemos prescindir de ellos en el seguimiento de esta contaminación. Con lo que nos quedarían 6 contaminantes, 4 predominantes (con concentraciones por encima de 100 mg/kg) Pb, As, Cu y Zn y dos en cantidades muy minoritarias, Cd y Tl.

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro



mg/kg, As y metales totales, valores medios, muestras de 0-10 cm

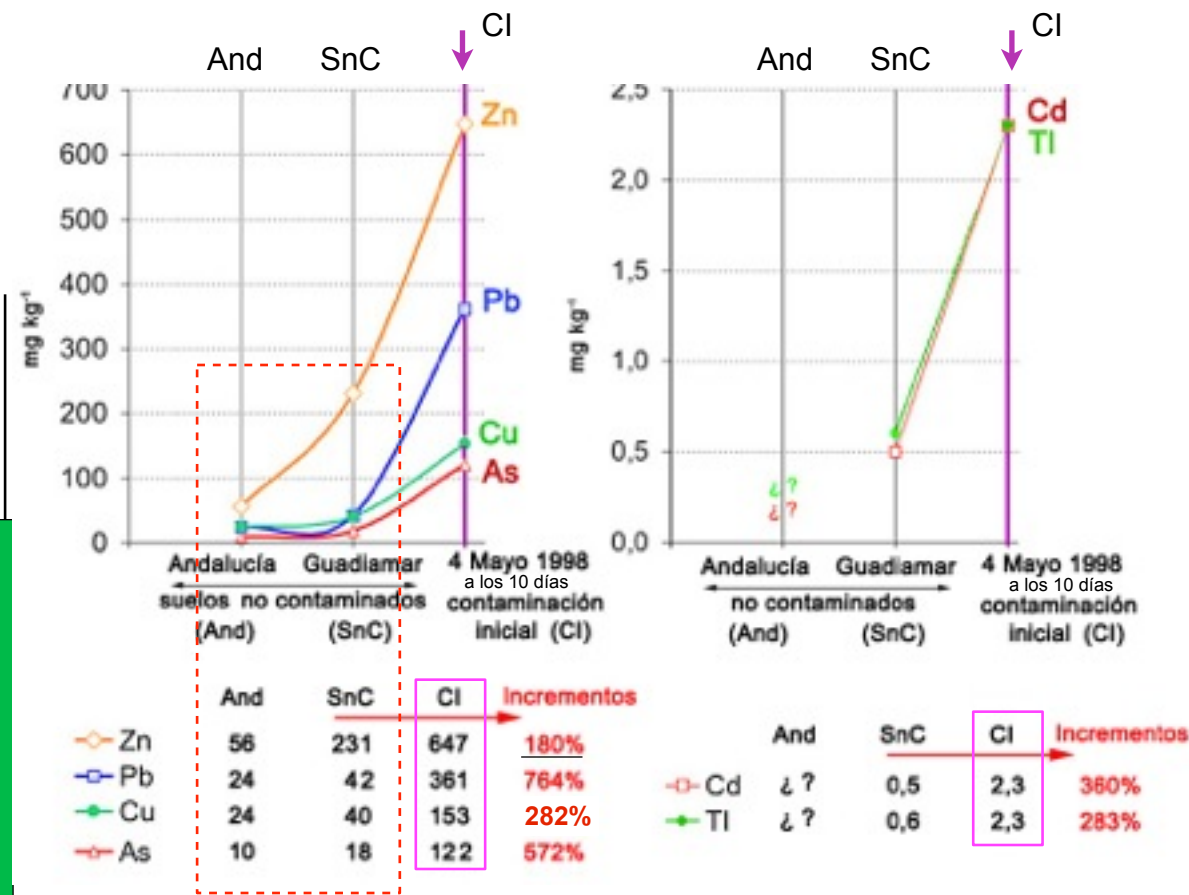
En esta imagen comparamos las concentraciones de los suelos contaminados en el momento del vertido frente a los no contaminados y a los valores medios de los suelos de Andalucía.

En primer lugar destaca el fuerte incremento de las concentraciones de los suelos contaminados, a los 10 días del vertido. Por ejemplo, el As pasó de 18 a 122 mg/kg

NOTA: los valores de la CI no coinciden exactamente con los de los suelos contaminados de las anteriores por que se desecho uno de los suelos por no ser representativo (estaba en una vereda que al estar en un primer momento todo recubierto de lodos no nos dimos cuenta).

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro



mg/kg, As y metales totales, valores medios, muestras de 0-10 cm

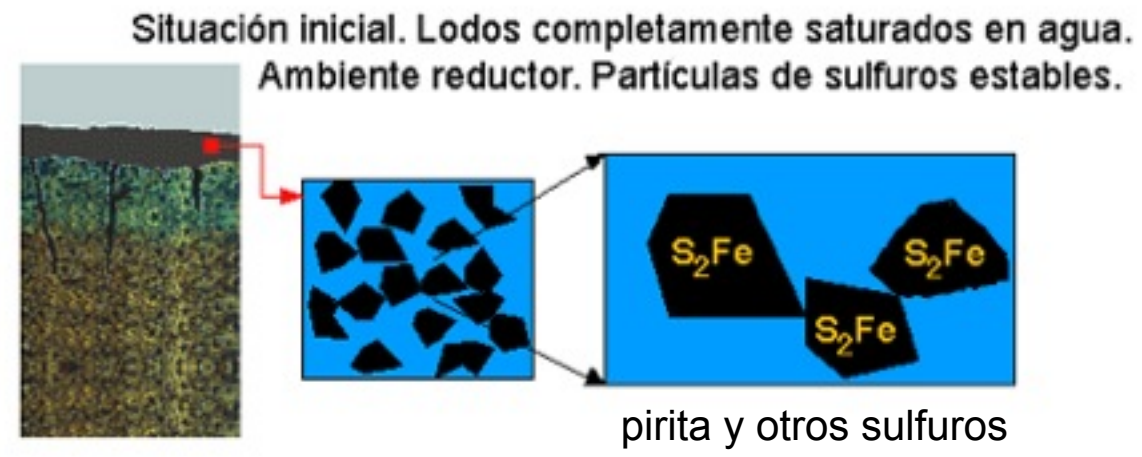
Con unos fuertes incrementos, que oscilan entre el 764% para el Pb al 180% para el Zn.

Pero también resulta interesante comparar las concentraciones de los suelos de la cuenca del Guadiamar que no quedaron afectados por el vertido con los valores medios de las concentraciones de los suelos andaluces. Vemos como los suelos de la cuenca del Guadiamar presentan unos valores mucho más altos (de 2 a 4 veces), lo que pone de manifiesto que antes de este vertido estos suelos ya se encontraban moderadamente contaminados como resultado de la prologada explotación de esta mina, desde el tiempo de los romanos.

Nota los incrementos parecen no cuadrar exactamente pero esto es debido a que los números originales tenían dos decimales

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro



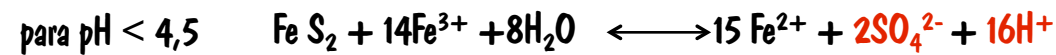
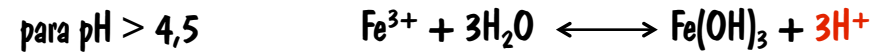
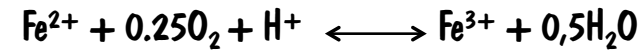
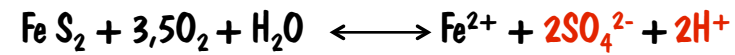
Bien en esta situación inicial los lodos al caer sobre los suelos pirita ...

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro

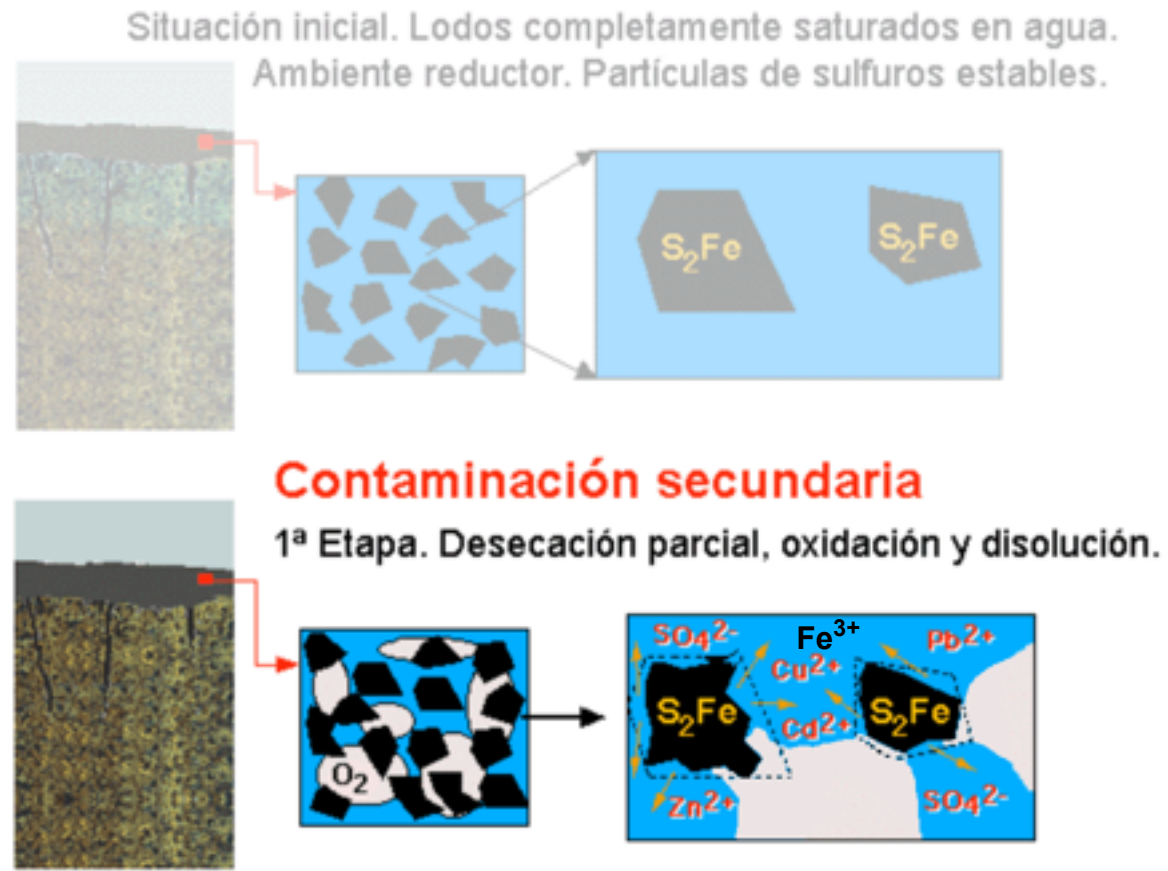


pero al quedar sobre la superficie del terreno, los lodos se van desecando, al ir transcurriendo el tiempo, y se va a producir una segunda contaminación aún más peligrosa que la del momento inicial. Efectivamente, al desecarse los lodos, el aire y por tanto el oxígeno va ocupando los poros, y el ambiente se vuelve oxidante



Como sabemos, en la piritita tanto el S como el Fe se encuentran en forma reducida y al contacto con el oxígeno del aire ambos se oxidan, primero lo hacen los sulfuros que pasan a sulfatos y luego el Fe que pasa a Fe³⁺.

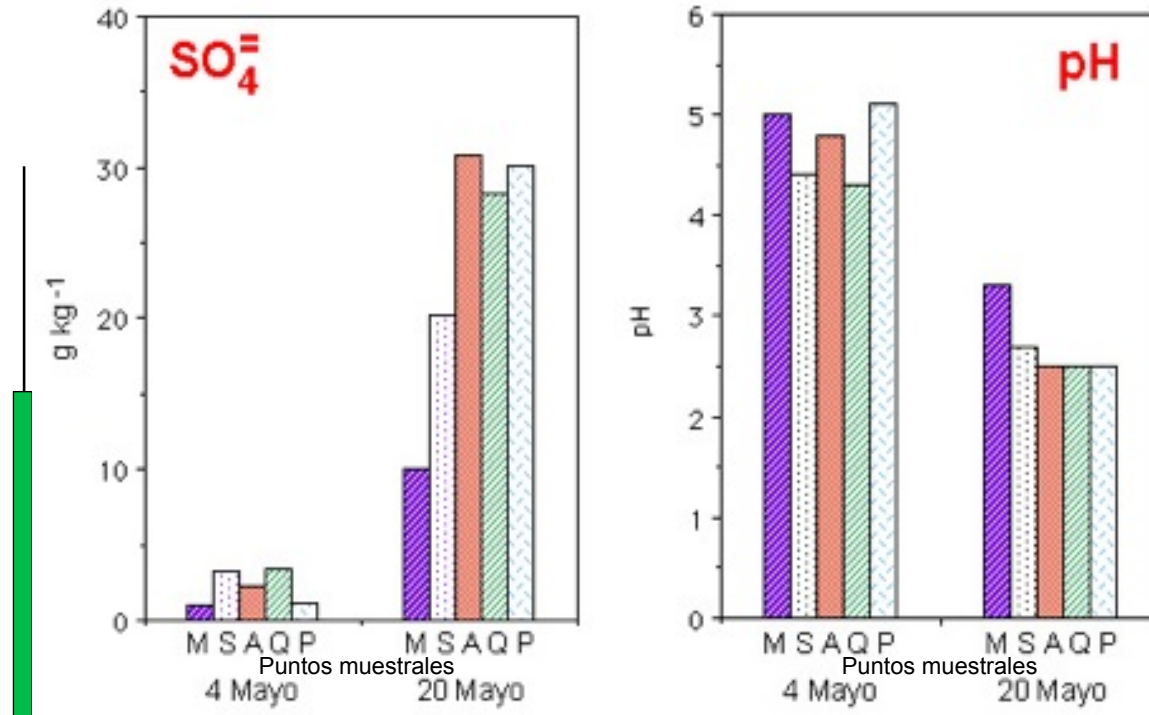
La oxidación de sulfuros es un proceso complejo biogeoquímico, en el que participan reacciones de **hidratación, oxidación e hidrólisis**; y en el que interviene el pH del suelo ya que a pHs muy ácidos las bacterias, como el *Thiobacillus ferrooxidans*, tienen un papel importantísimo como aceleradores de las reacciones. En definitiva, se liberan importantes cantidades de hidrogeniones y de ácido sulfúrico que van acidificando el medio.



los sulfuros pasan a sulfatos solubles. O sea, las partículas minerales se alteran, se descomponen, liberándose sus iones constituyentes como el As y los metales pesados que pasan a la solución.

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro

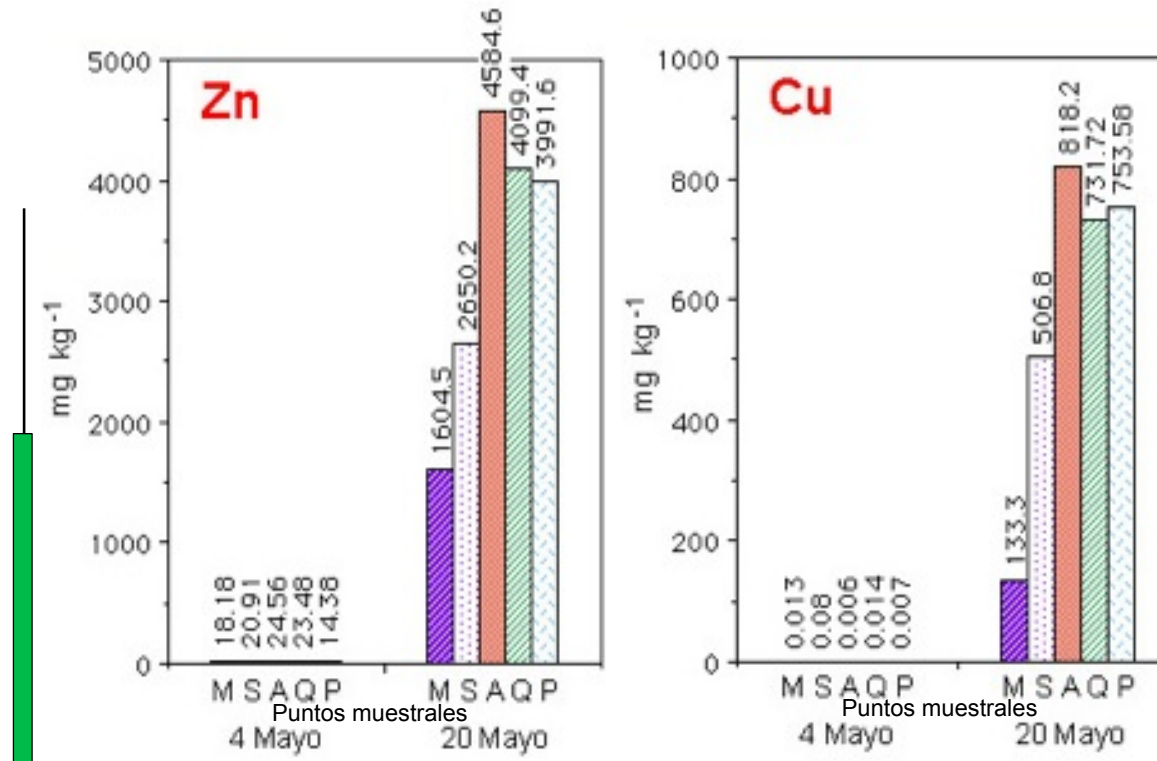


Extractos solubles de los lodos

Este proceso se comprobó ya en las muestras del segundo muestreo. A sólo 16 días del primer muestreo en los extractos solubles de los lodos se produce un fuerte incremento de los sulfatos (del orden de 10 a 30 veces), con una fuerte bajada del pH (de más de dos unidades) y se produce

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro



Extractos solubles de los lodos

un espectacular incremento en las concentraciones de metales en la solución de los lodos (pasando desde pocas decenas a miles de mg/kg), y todo esto ocurría, no lo olvidemos, en una capa que estaba encima de los suelos.

Aznalcóllar, hoy.

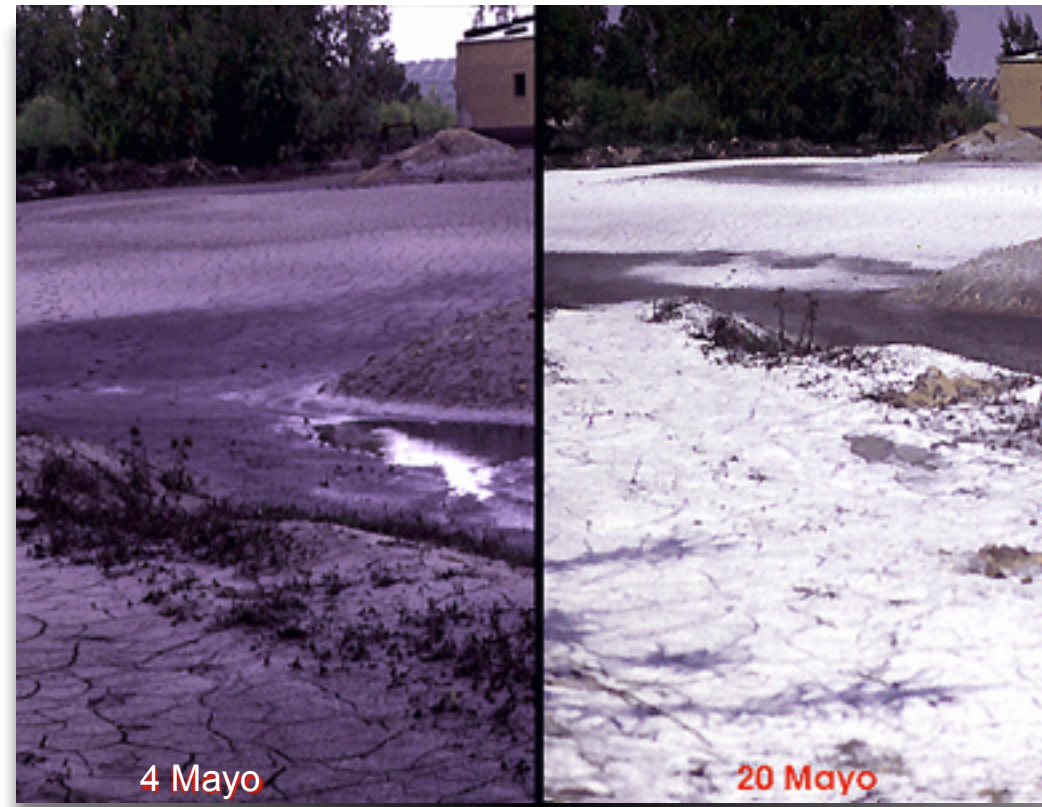
1. El accidente
2. La contaminación
3. La remediación
4. La no intervención
5. El futuro



Que en los lodos estaban ocurriendo cosas lo comprobamos en seguida, en nuestra segunda visita. La superficie se había vuelto completamente blanca, como si se hubiese producido una nevada.

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente
2. La contaminación
3. La remediación
4. La no intervención
5. El futuro



Los sulfuros de la superficie de los lodos se oxidaban y se formaban sales, principalmente:

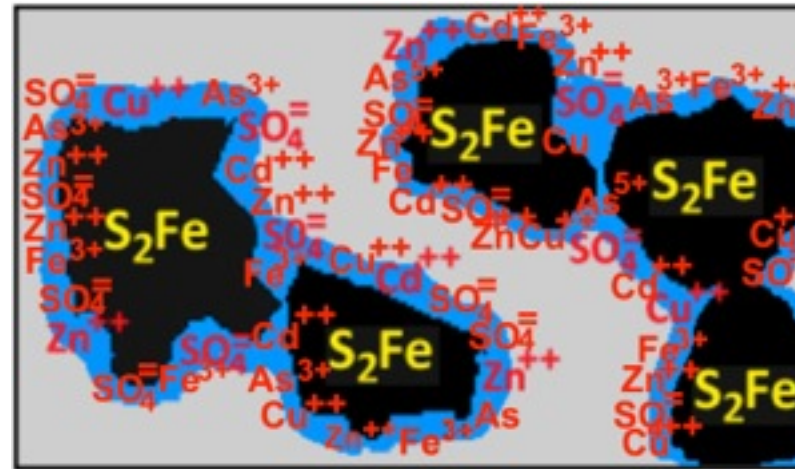
Bianchita
Beaverita
Hexaedrita

Contaminación secundaria

**Periodo
seco**

1ª Etapa, desecación, oxidación, disolución

Las sales disueltas quedan retenidas en los microporos de los lodos



Por otra parte, en el interior de los lodos al seguir desecándose, los sulfatos y los metales pasaban a la solución pero quedaban retenidos en los lodos, concretamente en la solución que formaba delgadas películas de agua higroscópica y capilar.

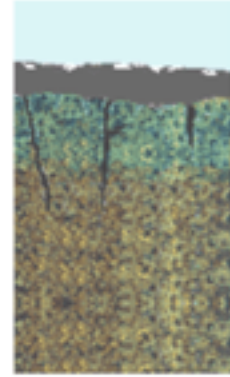
Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente
2. La contaminación
3. La remediación
4. La no intervención
5. El futuro



Todo esto ocurría en el periodo seco, pero con la llegada de las primeras lluvias ...
Primero las sales depositadas en la superficie se disolvían y penetraban dentro de los lodos,

Periodo
húmedo

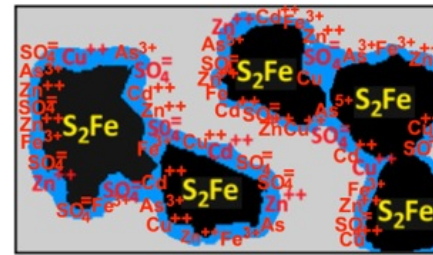


Contaminación secundaria

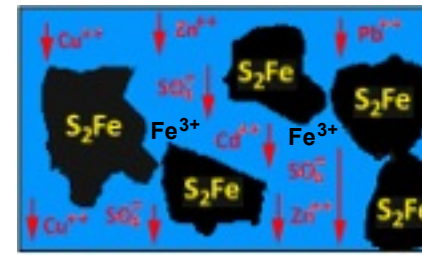
2ª Etapa. Contaminación.

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

Las sales disueltas quedan retenidas en los microporos de los lodos



son arrastradas al interior del suelo



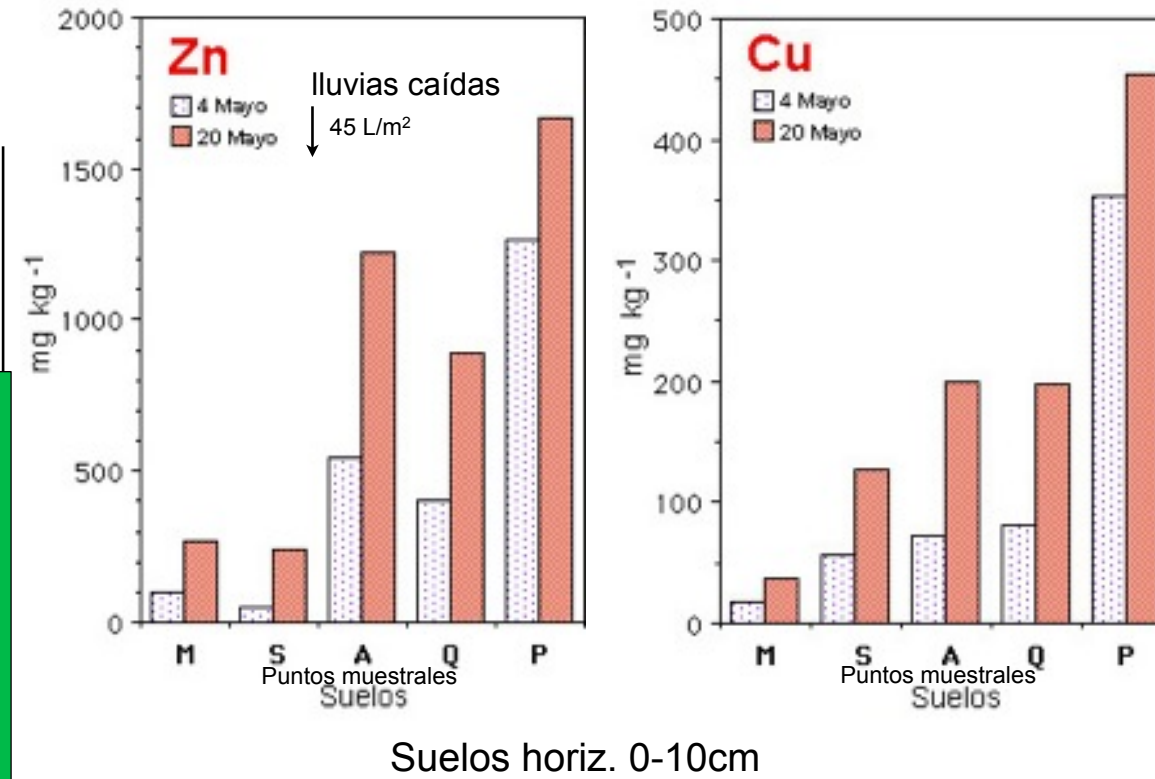
lluvias

Necesidad de retirar los lodos de la superficie del suelo

Y en el interior la capa de lodos se satura de agua de lluvia, este agua inunda los macroporos que carecen de capacidad de retención del agua, es en definitiva agua de gravedad que ya no puede ser retenida y se infiltran en el suelo produciendo una nueva contaminación, la contaminación secundaria, que podemos denominar como contaminación oxidativa.

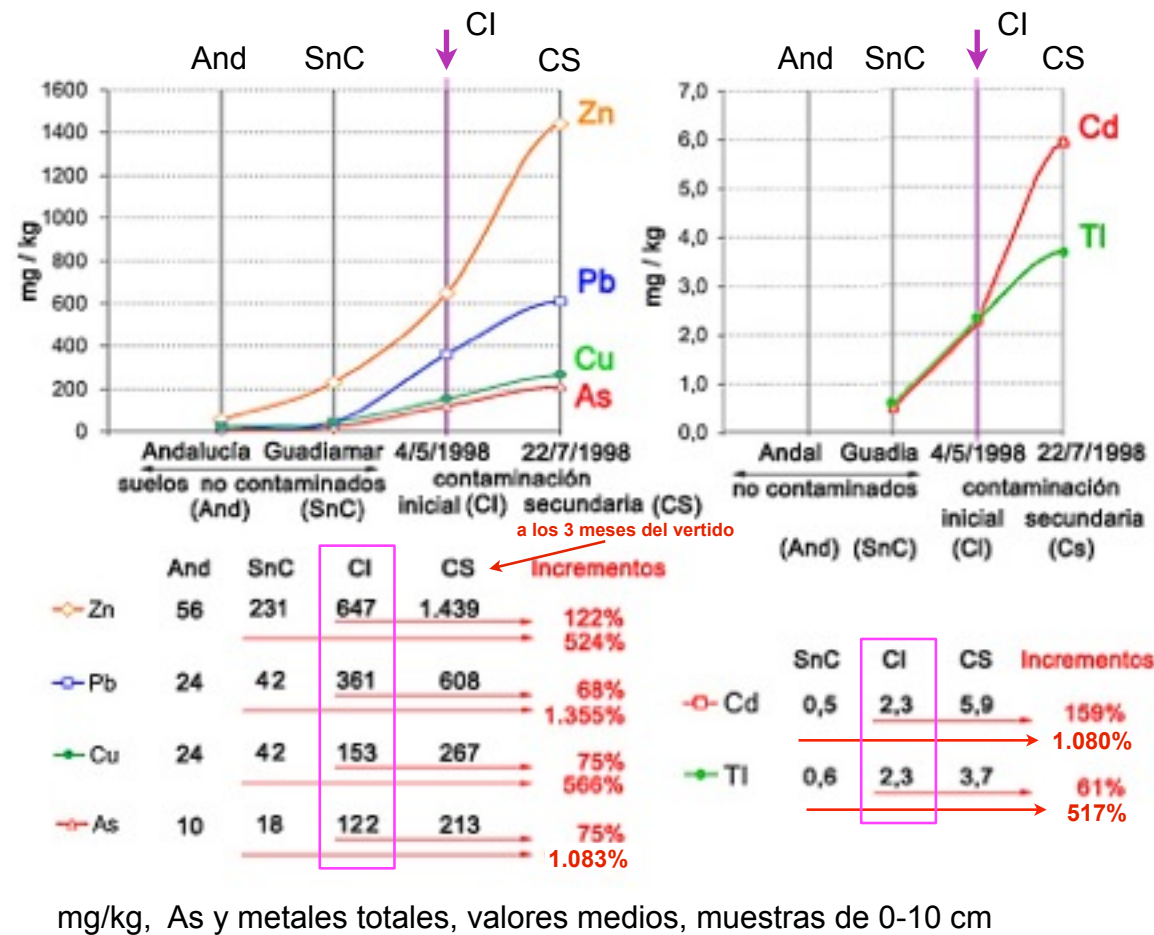
Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro



Efectivamente, aquí mostramos como ya en el segundo muestreo, con unas lluvias en la zona de 45 L/m , los suelos (insisto estamos hablando ya de lo que ocurre en los suelos, no en los lodos como era el caso de las pantallas anteriores) pues bien, los suelos muestran fuertes incrementos, (los datos del primer muestreo en blanco y el segundo muestreo en rojo) aquí mostramos el caso del Zn y del Cu pero similar comportamiento lo presenta el resto de los contaminantes.

Así, de esta manera los suelos resultan fuertemente contaminados, cada vez más, conforme iba transcurriendo el tiempo y de aquí surge la necesidad imperiosa de retirar la capa de lodos que recubre a los suelos.



De manera que valores medios de los suelos en su horizonte superficial a sólo tres meses del vertido, al final de julio, transcurridos sólo tres meses del vertido, las concentraciones se han doblado (caso del Zn y Cd) o casi. A esta contaminación secundaria, por su causa, la llamamos contaminación oxidativa,

Bien esta contaminación secundaria suponía unos incrementos del orden de un 70%, con unos máximos del 159% para el Cd, con respecto a las concentraciones de la contaminación inicial y que alcanzan valores extremos si se comparan con las concentraciones presentes en los suelos antes del vertido, con incrementos totales de hasta el 1.083%, caso del As, a sólo tres meses del vertido pasa de 18 a 213 mg/kg.

• 3 La remediación

Primera medida: retirada de la capa de lodos, 1998

Bien estaba claro que la contaminación inicial había sido muy importante y que al pasar el tiempo la situación se agravaba. La situación pues era crítica y ante esta situación había que intervenir para rehabilitar la zona, lo primero que había que hacer estaba claro: ¡la retirada de la capa de lodos que recubría los suelos! y además había que hacerlo lo más rápidamente posible ya que a la luz de los resultados aquella capa de lodos representaba una auténtica bomba química. Y así se le comunicó a la Junta de Andalucía y la Junta, así lo hizo.

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro



Así nos encontramos la zona a los 10 días del vertido

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente
2. La contaminación
3. La remediación
4. La no intervención
5. El futuro



Y así quedó toda la zona seis meses después, con los lodos retirados.

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro



Realmente se realizó una labor faraónica y en un tiempo record.
Se movieron más de 7 millones de metros cúbicos de lodos y suelos.

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro

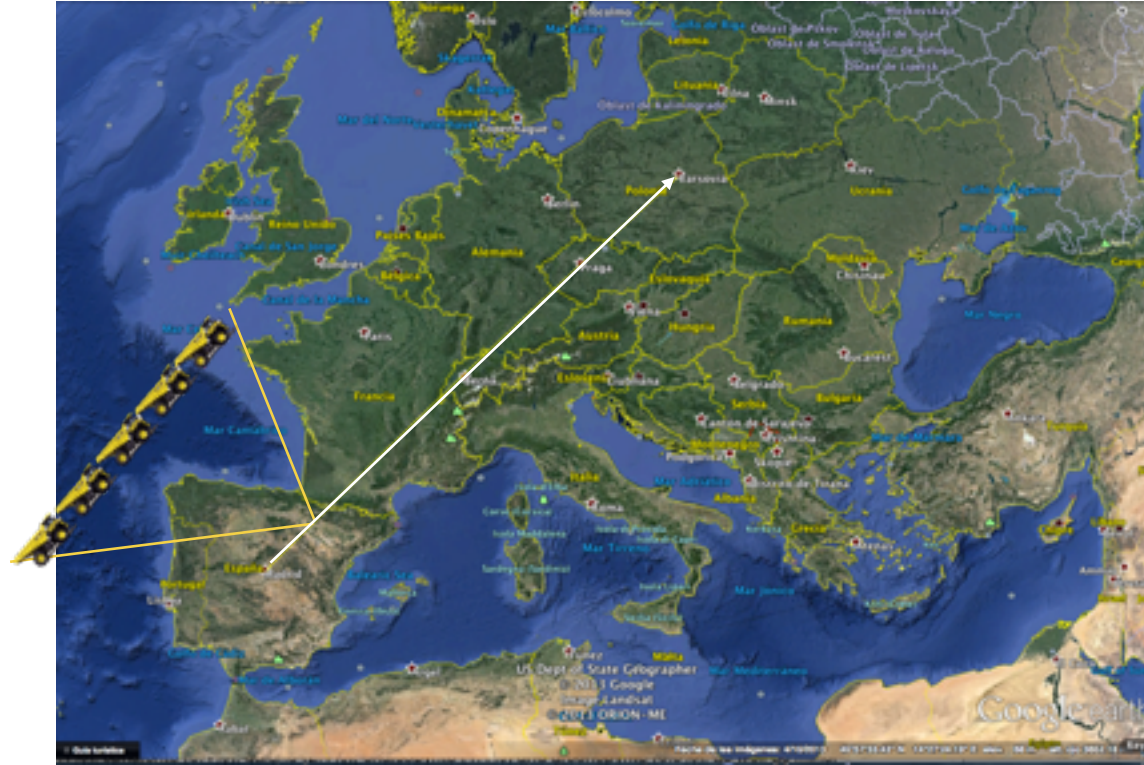


Como se había calculado que el vertido correspondiente a los lodos fue del orden de 1 millón de m³ pues se perdieron en la zona unos 6 millones de m³ de suelos, lo representa que los suelos se decapitaron una media de más de 30 cm, los 30 cm superficiales, donde radica fundamentalmente la fertilidad del suelo. Por otra parte, se calcula que los camiones que transportaron los lodos pudieron dar 350 vueltas a la Tierra por el ecuador.

Para transportar toda esta tierra se necesitaron 280.000 portes.

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro



Y si se colocaran 280.000 camiones/dumper en una fila uno detrás de otro ocuparían la distancia que hay entre Madrid y Varsovia.

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente
2. La contaminación
3. La remediación
4. La no intervención
5. El futuro



Los lodos con la capa superficial de los suelos se llevaron a la antigua corta,

que se rellenó en gran medida.

Aznalcóllar, hoy.

- 1. El accidente
- 2. La contaminación
- 3. La remediación
- 4. La no intervención
- 5. El futuro



Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente
2. La contaminación
3. La remediación
4. La no intervención
5. El futuro



Y todo esto en unas condiciones muy duras, con todo tipo de protecciones y a 40°, lo que hacía el trabajo muy engorroso, ... claro que nosotros pertenecíamos a otra empresa.

Aznalcóllar, hoy.

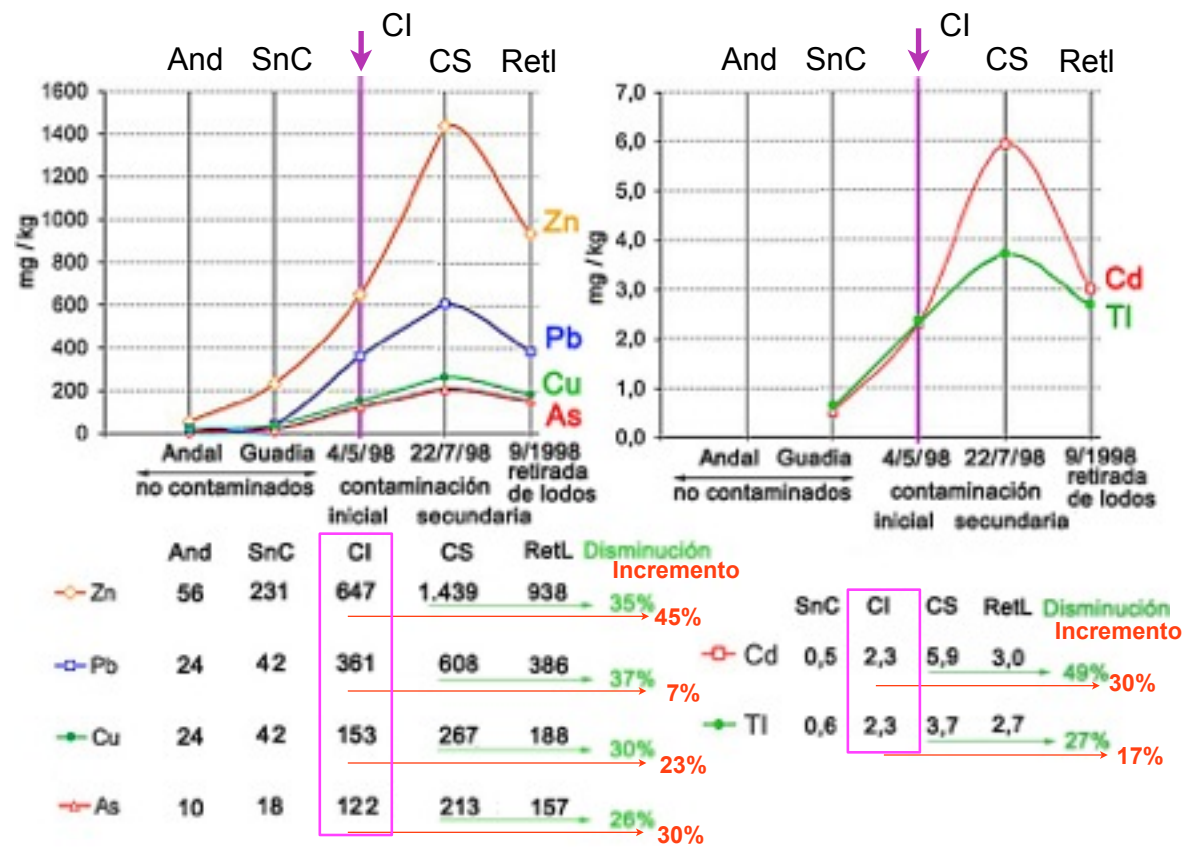
1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro



Pero la situación realmente no estaba para muchas bromas, pues había también una contaminación eólica muy fuerte.

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro



Bueno, con la retirada de los lodos la contaminación se redujo sensiblemente. Se había conseguido rebajar la contaminación en algo más de un 30% (siempre trabajando sobre fracción total, valores medios y en muestras de horizontes superficiales), pero los resultados no eran demasiado gratificantes. Pues **después de retirar siete millones de metros cúbicos de lodos y suelos y gastar** más de 100 millones de euros, la contaminación era mayor de la que hubo en un primer momento. ¡Sólo se había rebajado la contaminación secundaria en aproximadamente un 30%.¡Había que seguir trabajando!

3. La remediación de la zona

Primera medida: retirada de la capa de lodos, 1998

Medidas complementarias, 1999-2000

En los años siguientes, durante el 1999 y 2000 se llevaron a cabo una serie de medidas enmendantes.

Aznalcóllar, hoy.

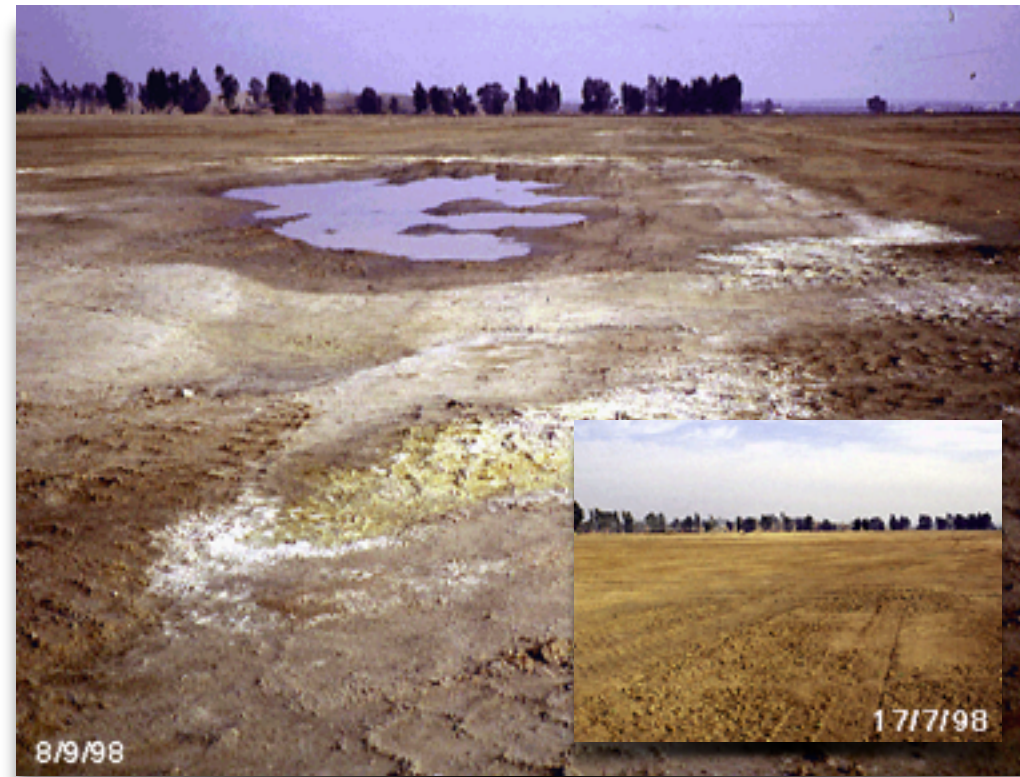
1. El accidente
2. La contaminación
3. La remediación
4. La no intervención
5. El futuro



Que la zona no había quedado totalmente limpia, lo pudimos comprobar directamente en el campo. En julio así estaba esta zona y

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente
2. La contaminación
3. La remediación
4. La no intervención
5. El futuro

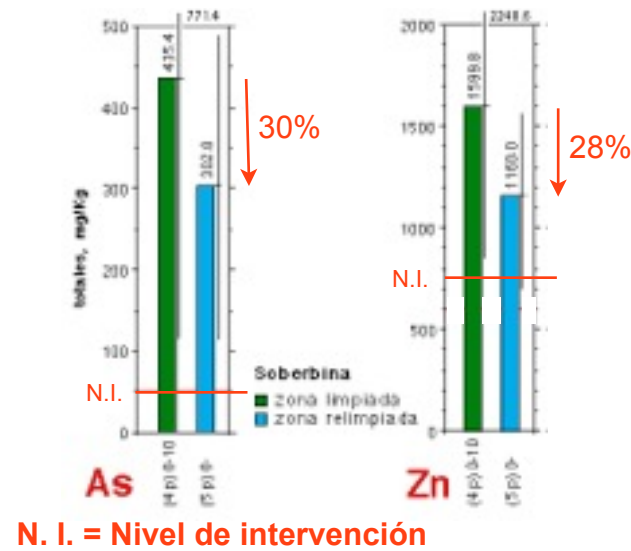


cuando volvimos del verano, tan sólo dos meses después ofrecía este aspecto. Con las escasas lluvias del verano el aspecto de la zona había cambiado. Las lluvias habían sacado la contaminación oculta en los suelos.

Medidas complementarias

Actuaciones, 1999/2000

1 Revisar la limpieza



Lo primero que se hizo fue relimpiar las zonas que habían quedado más contaminadas a costa de perder gran cantidad de suelo y se consiguió rebajar bastante la contaminación aunque no lo suficiente (la concentración media seguía por encima del NI para el As y varios metales).

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro

Medidas complementarias

Actuaciones, 1999/2000

1 Revisar la limpieza

2 Fitorremediación

Para seguir eliminando contaminantes se pensó en la fitorremediación.

Se pensó, en un primer momento, importar plantas de África de probado poder de asimilación de As y metales, pero se desechó por la dificultad de su aclimatación y se optó por plantar plantas autóctonas

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente
2. La contaminación
3. La remediación
4. La no intervención
5. El futuro



y así se hizo, pero las parcelas de experimentación fracasaron; algunas no germinaron, en muchos otros casos el desarrollo de las plantas fue escaso, otras se secaron y la absorción final de metales en la parcela fue muy escasa. Por todo ello la experiencia se abandonó.

Vicario: Brassica juncea (recolección 3000 kg/ha y año)

As cantidad a extraer 600 kg/ha. extracción 0,6 g/ha año . Número de cosechas 1.000.000

Pb	370	1,6	230.000
Cu	149	3,1	48.000
Zn	1224	80,5	15.000

Medidas complementarias

Objetivos

A) Disminución de las concentraciones

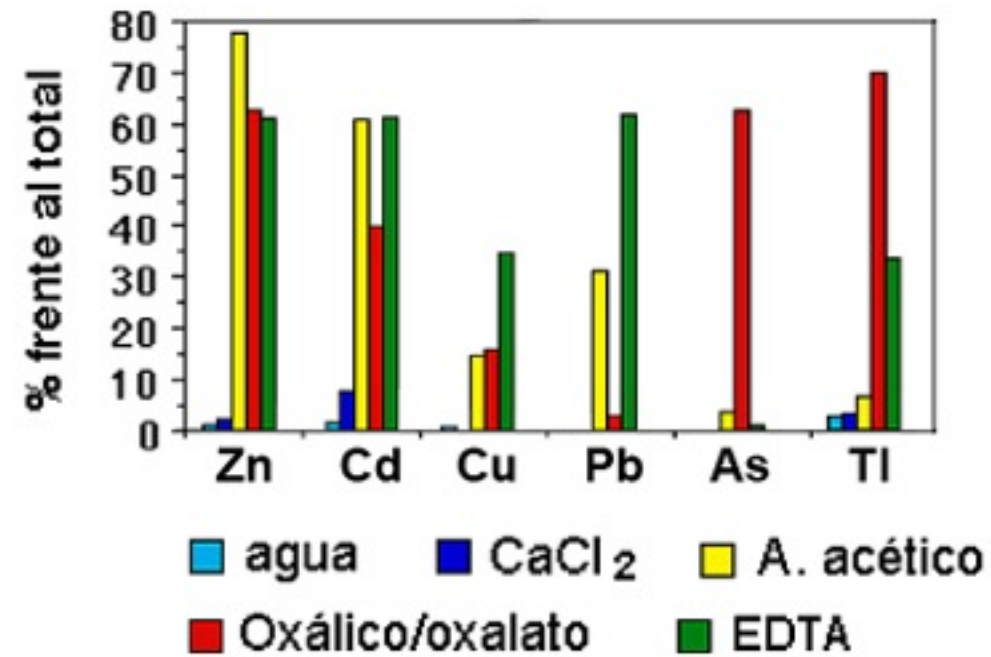
B) Inmovilización de los contaminantes

Bien se había hecho lo que se podía para eliminar contaminantes. ¿Qué otra cosa se podía hacer?
Pues se pensó que si no se podía eliminar más contaminantes se buscó en, al menos, inmovilizarlos.

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro

Fraccionamiento de los metales pesados



Para ello lo primero que se hizo fue determinar como de móviles se encontraban y a que constituyentes del suelo mostraban más afinidad, para lo cual se realizó una serie de extracciones de las muestras de suelos con diversos agentes: agua para los solubles, cloruro cálcico para los metales adsorbidos en el complejo de cambio, ácido acético para conocer los contaminantes ocluídos con los carbonatos, oxalato-oxálico para los fijados por los compuestos de Fe, y para englobar a todos los que se presentaban en fase asimilable por las plantas se utilizó el EDTA. En general las extracciones fueron altas con lo que se pensó en la conveniencia de añadir bloquenes.

EDTA = Acido etilendiaminotetraacético

Medidas complementarias

Actuaciones, 1999/2000

1 Revisar la limpieza

2 Fitorremediación ¿?

3 Adición de bloqueantes:

carbonatos
óxidos de Fe
arcillas
materia orgánica

carbonatos: espumas de azucarera

óxidos Fe + arcillas: suelo rojo

materia orgánica: estiércol

Y estos fueron los agentes bloqueantes añadidos

Para los carbonatos: se hicieron pruebas en el laboratorio del poder encalante con carbonato de calcio puro, cenizas de celulosa, lodo de depuradora y espumas de azucarera.

Se eligieron las espumas de azucarera por: High CaCO_3 content (40%), Very fine particle size (reactive), High OM content (15-20%), Cheap (industrial waste).

Para calcular la cantidad de a añadir de espumas de azucarera se hizo una valoración en el laboratorio del poder neutralizante de la acidez.

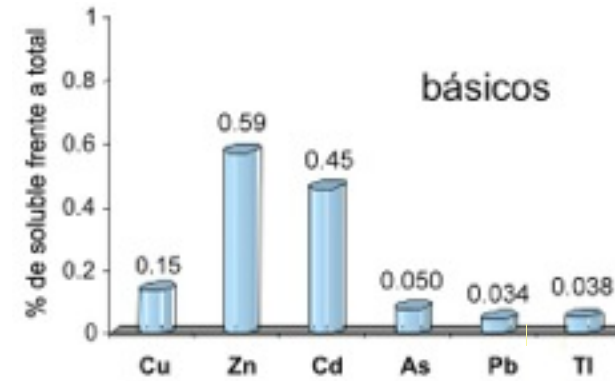
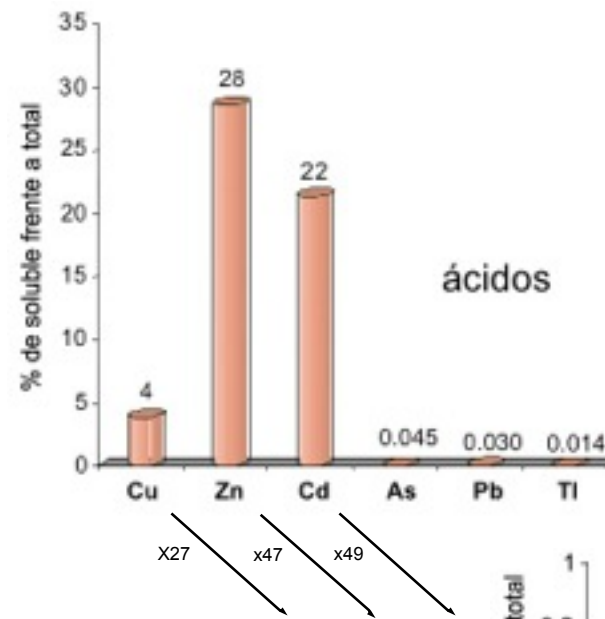
Finalmente se añadieron 4 kg m^{-2} (es decir, 40.000 kg/ha) en la zona ácida (max. 15) y 2 kg m^{-2} zona neutra y básica.

Para los óxidos de Fe y las arcillas (bentonitas) se hicieron pruebas en parcelas experimentales y se añadió un suelo rico en óxidos de Fe y arcillas a 20.000 kg/ha.

Con la materia orgánica hubo problemas en su adquisición y sólo se añadió a una pequeña parte de la zona.

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro



**Solubles
frente a
totales**

Además con los carbonatos se podía neutralizar la acidez y conseguir la inmovilización de muchos metales que eran mucho más móviles (de hasta casi 50 veces) en los suelos ácidos frente a los básicos, como se observa en estas gráficas en las que se compara el porcentaje del elemento traza soluble frente al total en los suelos ácidos y básicos. Por ejemplo, soluble el 28 y 22% para Zn y Cd en los ácidos que baja o menos del 1% en los básicos.

Medidas complementarias

Objetivos

A) Disminución de las concentraciones

B) Inmovilización de los contaminantes

C) Dilución de la concentraciones

Bien, aparte de eliminar e inmovilizar los contaminantes ¿Que más se podía hacer?. Pues se pensó en que si no se podían extraer ni bloquear más contaminantes, al menos se podría intentar diluirlos.

Medias, totales, mg/kg

prof. cm	As	Zn	Pb	Cu	Cd	Tl
0 a 10	129,1	704,3	329,9	164,0	2,3	2,3
10 a 30	59,4	424,5	147,4	125,0	1,4	0,9
30 a 50	43,7	370,7	107,5	126,4	1,3	0,7
0 a 25	87,3	536,4	220,4	140,6	1,8	1,5
nivel de intervención en suelos agrícolas	50	600	350	300	7	5

Como en el horizonte superficial era donde se producían las máximas concentraciones se podría mezclar este con el horizonte subsuperficial que estaba menos contaminado. Eran los mismos contaminantes pero mejor repartidos.

Medidas complementarias

Actuaciones, 1999/2000

1 Revisar la limpieza

2 Fitorremediación ¿?

3 Adición de bloqueantes:

carbonatos, óxidos de Fe, arcillas, estiércol.

4 Arado profundo



un simple arado profundo en toda la zona podría servir.

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente
2. La contaminación
3. La remediación
4. La no intervención
5. El futuro



El arado fue esencial en la zona ácida en la que los suelos había sufrido un fuerte encostramiento superficial, impidiendo por completo el desarrollo de las plantas.

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente
2. La contaminación
3. La remediación
4. La no intervención
5. El futuro



Pero a los pocos meses del arado del suelo todavía la zona mostraba claros signos de degradación. La superficie no estaba estabilizada. Había intensos signos de fuertes escorrentías y erosión.

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente
2. La contaminación
3. La remediación
4. La no intervención
5. El futuro



Y con las lluvias los metales eran arrastrados por las aguas de escorrentía.

Medidas complementarias

Objetivos

- A) Disminución de las concentraciones
- B) Inmovilización de los contaminantes
- C) Dilución de la concentraciones
- D) Freno a la escorrentía y a la erosión**

La últimas medidas buscaron un freno a la escorrentía y a la erosión, en definitiva había que estabilizar la nueva superficie del terreno.

Medidas complementarias

Actuaciones, 1999/2000

1 Revisar la limpieza

2 Fitorremediación ¿?

3 Adición de bloqueante
carbonatos, óxidos

4 Arado profundo

5 **Revegetación**



para ello se procedió a una intensa campaña de revegetación

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente
2. La contaminación
3. La remediación
4. La no intervención
5. El futuro



se sembraron gramíneas y otras especies autóctonas. Y numerosas especies arbóreas ...

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente
2. La contaminación
3. La remediación
4. La no intervención
5. El futuro



en muchísimos casos los arboles plantados fracasaron, pero en otros muchos casos si se desarrollaron ...

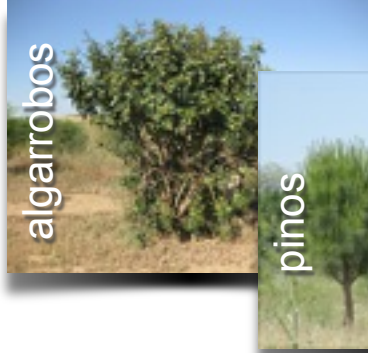
... como es el caso de los ...

Aznalcóllar, hoy.

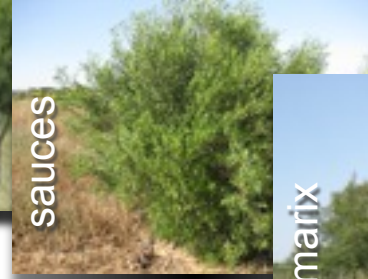
1. El accidente
2. La contaminación
3. La remediación
4. La no intervención
5. El futuro



algarrobos



pinos



sauces



tamarix



eucaliptos



olmos



acebuches



lentiscos

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente
2. La contaminación
3. La remediación
4. La no intervención
5. El futuro



Para evitar que cualquier posible actividad agrícola en estos suelos pudiera repercutir desfavorablemente en la aceptación por los mercados de los productos agrícolas de la región, la zona del vertido se expropió, se cercó, se estableció lo que se llama el Corredor Verde del Guadiamar, corredor entre las marismas y Sierra Morena y se prohibió cualquier uso, no sólo agrícola sino

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente
2. La contaminación
3. La remediación
4. La no intervención
5. El futuro



también se prohibió la caza, pesca y el pastoreo ...

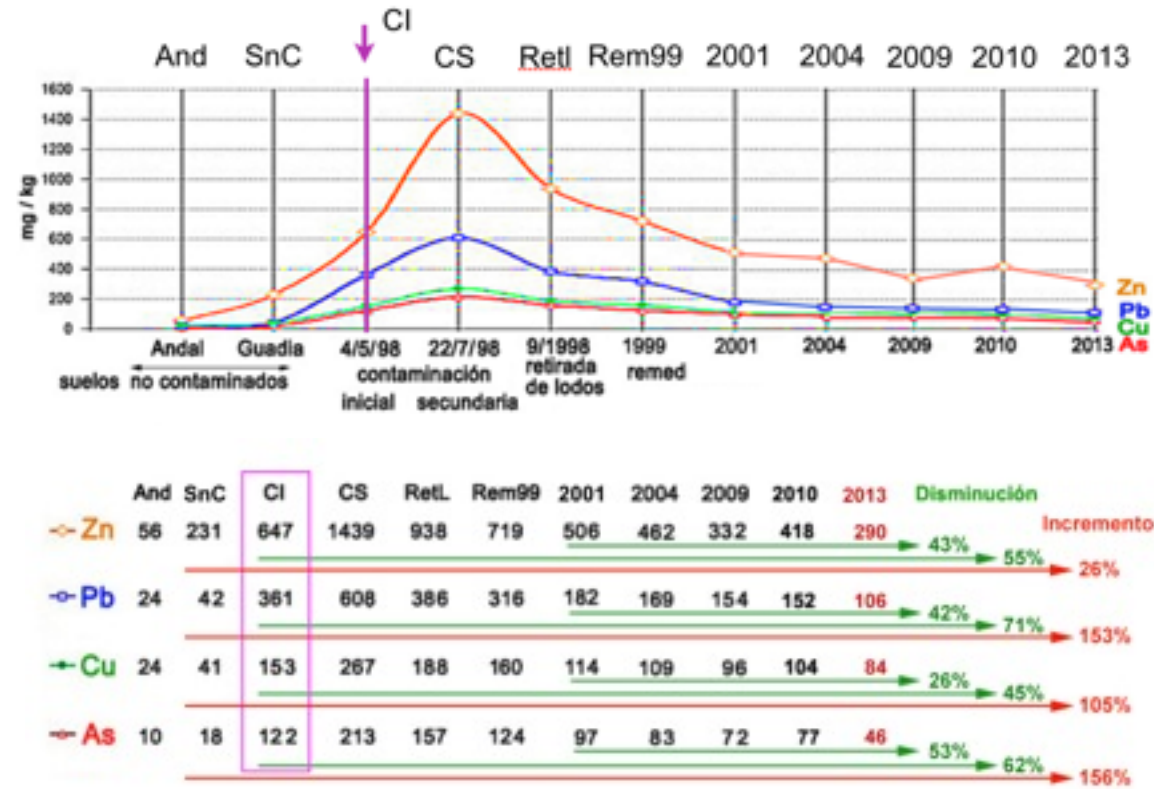
Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente
2. La contaminación
3. La remediación
4. La no intervención
5. El futuro



aunque luego cada aquí, en este país nuestro, cada uno interpreta las normas a su manera.

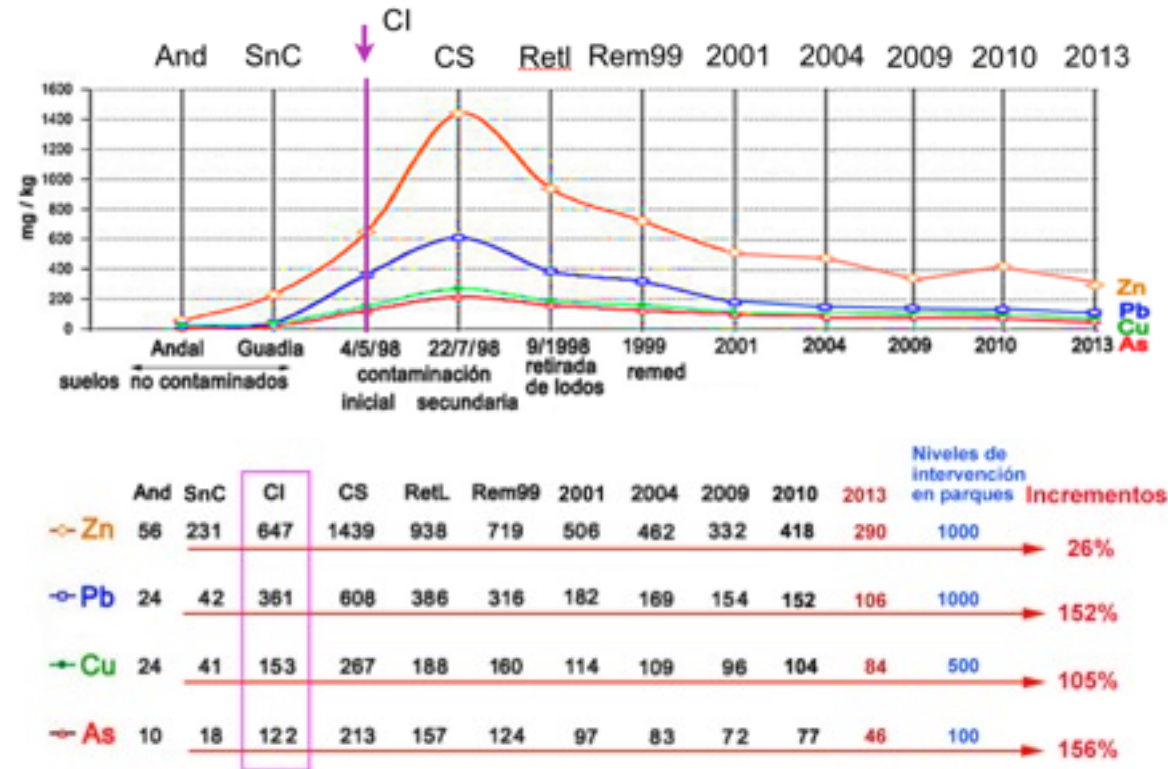
Evolución



mg/kg, As y metales totales, valores medios, muestras de 0-10 cm

A partir del 2001 ya no se llevó a cabo ninguna labor de remediación importante, pero en nuestro seguimiento de los años 2004, 2009, 2010 y 2013 las concentraciones han seguido disminuyendo del orden de un 26 a un 53% con respecto a las últimas medidas de remediación y disminuyendo aún mas si comparamos a la contaminación inicial y ya por fin se habian rebajado las contaminaciones iniciales en el momento del vertido, pero desgraciadamente todavía las concentraciones medias de los suelos, en su horizonte superficial, se encuentran por encima de los valores de los suelos de antes del vertido, hasta un 156% para el As.

Evolución

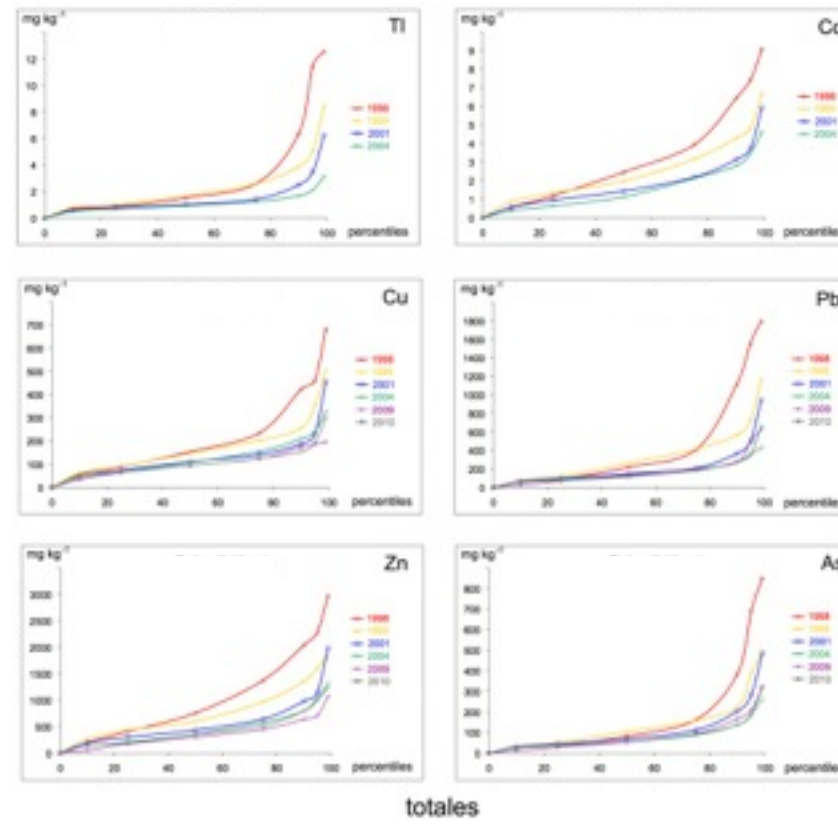


mg/kg, As y metales totales, valores medios, muestras de 0-10 cm

No obstante el valor medio de todos los contaminantes estaban por debajo de los niveles de intervención establecidos para parques. Pero ¡ojo!, estamos hablando de valores medios, esto sólo representa el valor medio para los suelos. De hecho hasta este momento sólo hemos hablado de valores medios, pero es muy importante conocer el comportamiento de la toda la población de suelos, para conocer, por ejemplo cuantos suelos presentan concentraciones superiores al valor establecido para el nivel de intervención. Para ello podemos recurrir a los percentiles.

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro



mg/kg, As y metales totales, valores medios, muestras de 0-10 cm

En estas gráficas podemos ver como la tendencia general es a bajar las concentraciones de los percentiles al ir transcurriendo el tiempo.

Aznalcóllar, hoy.

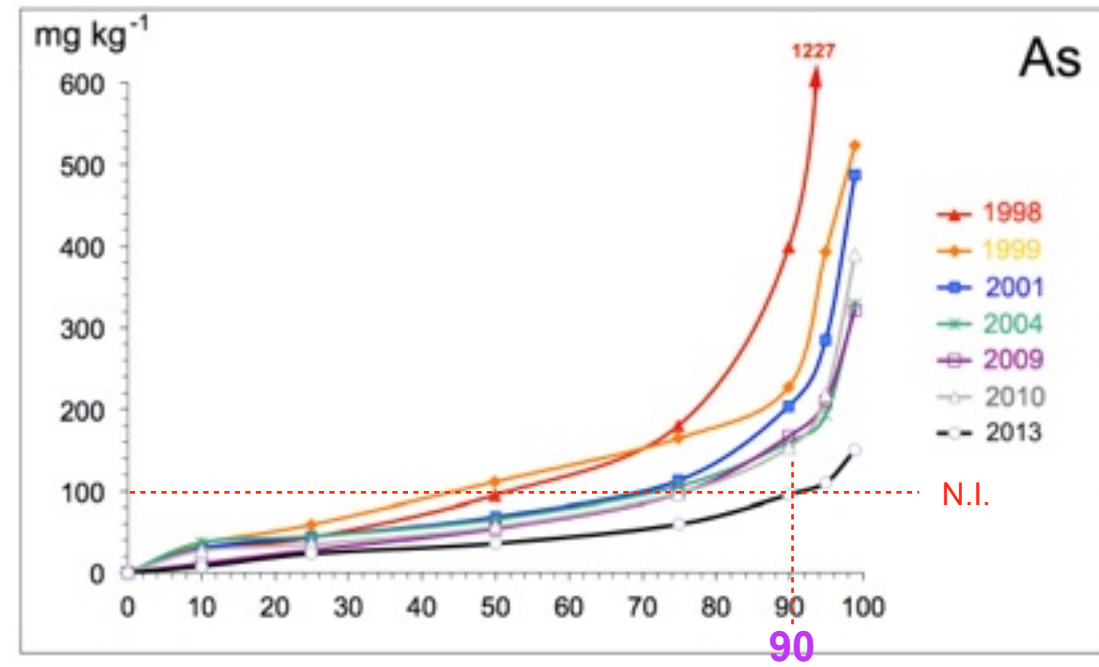
1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro



Si referimos estas concentraciones a las de los niveles de intervención de los suelos de parques naturales, destacamos como para el Cd, TI, Cu y Pb a partir del 2004 el 100% de los suelos está por debajo de este N.I.; En cuanto al Zn en el 2010 tenemos el 96 percentil con concentraciones por debajo del N.I., es decir sólo un 4% de los suelos podría considerarse como potencialmente contaminado; y sólo para el As encontramos una situación delicada, con el percentil 76 con una concentración por debajo del N.I., o sea que un 24% de los suelos en las muestras de 2010 superan este N.I. de 100 mg/kg

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro



N.I. = niveles de intervención suelos de parques

valores medios, muestras de 0-10 cm

Si vemos ahora la gráfica del As ampliada con datos del 2013 podemos observar que el percentil 90 tiene una concentración por debajo del N.I., o sea que sólo un 10% de los suelos en las muestras actuales superan este N.I. de 100 mg/kg

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro

totales

Uso del suelo: agrícola		
	nivel interv. mg kg ⁻¹	suelos potencialmente contaminados
1998		
Cd	7/10	7%
Cu	300/500	8%
Tl	5	11%
Pb	350/500	26%
Zn	600/1000	42%
As	50	68%

Uso del suelo: Parques nacionales		
	nivel interv. mg kg ⁻¹	suelos potencialmente contaminados
2013		
Cd	15	0%
Cu	500	0%
Tl	10	0%
Pb	1000	0%
Zn	1000	0%
As	100	10%

Si comparamos la situación actual con la que se presentaba en el año del vertido vemos que la situación ha mejorado sensiblemente. En aquel año superaban los N.I. el 7% de los suelos para el Cd, el 8% para Cu, 11% para Tl, 26% para el Pb y 42% para el Zn, mientras que en 2013 sólo el 10% los suelos puede presentar problemas con el As.

Si bien hemos de aclarar que esta tablas tienen una pequeña argucia. Y es los valores de los niveles de intervención que se usa en cada situación. Efectivamente los N.I. de 1988 está referidos a suelos agrícolas mientras que para el 2009 hemos usado los N.I. para suelos de parques, y como sabemos con valores de los límites más altos, pero es que estos son los usos reales de los suelos en cada fecha, por tanto el criterio utilizado lo consideramos totalmente correcto.

Podemos pues afirmar rotundamente que las medidas de remediación llevadas a cabo deben ser valoradas muy positivamente, aunque en honor a la verdad ha quedado con cierta contaminación.

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro



Bien queda contaminación pero de cualquier forma la situación no es tan grave como la veían algunos

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro

en paliar este
uede hacerlo?
decidir.
onces?
oblamiento
na carretera
salida por el
or la reserva.
spadas»
ue los vecinos



Pero tampoco la situación era tan optimista como la veían otros como ...

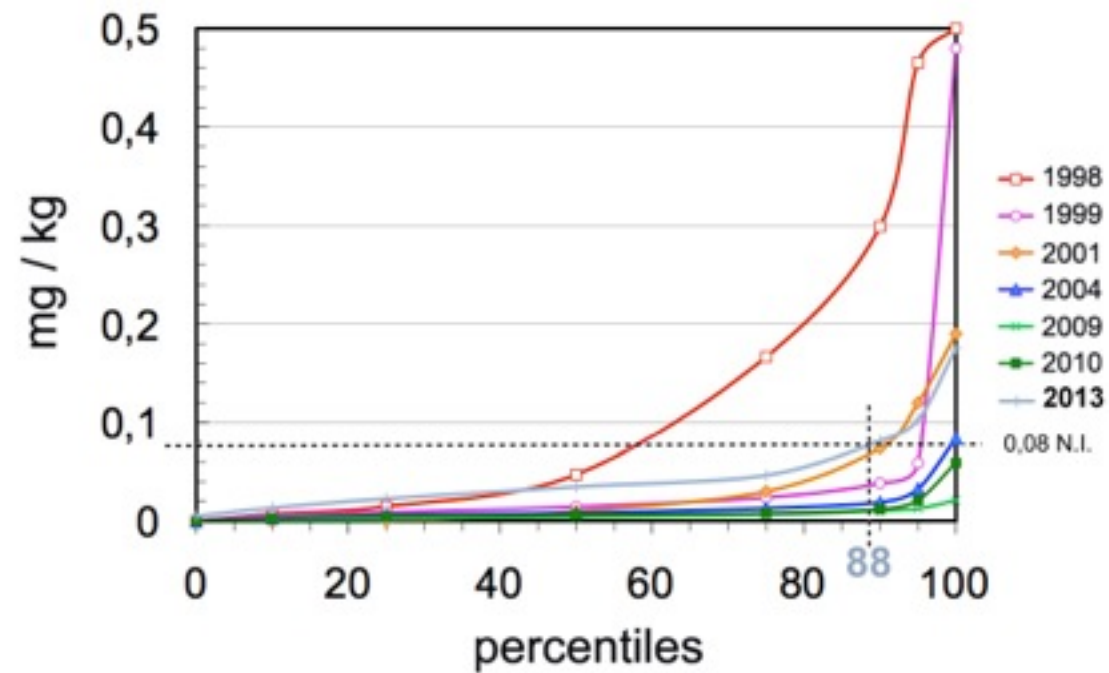
Como hemos mostrado en anteriores imágenes, la situación real es que si bien sólo hay posibles problemas de toxicidad para el As en un 24% de los suelos, el resto de metales pesados aunque no se han superado los límites de peligrosidad si han quedado los suelos con unos incrementos que oscilan entre el 30 y el 300% con respecto a las concentraciones antes del vertido. ¡Decir que la zona ha quedado más limpia ... con un incremento de casi el 300% de As!

Bien parece probado que en la zona ha quedado un problema con el As, que supera el NI en un 10% de los suelos. Pero todavía podemos precisar más. Ahora debemos plantearnos como de peligroso es este As, es decir como se encuentra este As. ¿Está soluble y por tanto es tóxico o está en gran parte insoluble y por tanto sólo es potencialmente tóxico para un posible futuro?.

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro

As soluble, 0-10 cm



Bien, en esta gráfica representamos los percentiles de la fracción As soluble.

Actualmente la comunidad científica no ha llegado a establecer unos niveles de intervención universalmente aceptados para el As y metales pesados en la solución del suelo. En su defecto hemos recurrido a los niveles máximos definidos por la FAO para que un agua pueda ser utilizada para consumo del ganado. Este nivel de intervención para el As es de 0,08 mg/kg.

En el año del vertido un porcentaje importante de los suelos superaba este límite establecido por la FAO. El percentil tiene este valor, o sea el 42% de los suelos se encontraban en situación de toxicidad.

En las muestras del 1999 se produce una fuerte caída de las concentraciones y en años siguientes han mostrado ligeras oscilaciones, manteniéndose en las muestras actuales un nivel tóxico en el 12% de los suelos.

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente
2. La contaminación
3. La remediación
4. La no intervención
5. El futuro



La zona hoy día parece no mostrar signos de toxicidad. Este es el aspecto que muestra la ribera del Guadiamar. Así es como estaba antes del vertido y así estuvo durante las primeras medidas de rehabilitación.

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente
2. La contaminación
3. La remediación
4. La no intervención
5. El futuro



en la mayor parte de la zona, especialmente en la zona carbonatada, la implantación de la vegetación es muy completa

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente
2. La contaminación
3. La remediación
4. La no intervención
5. El futuro



aunque, siguen habiendo claros, especialmente en la zona ácida.

- 4 Evolución sin intervención

¿La retirada de los lodos fue una decisión correcta?

Bien, ahora podemos plantearnos, si me permiten la expresión, la pregunta del millón, que hubiese pasado en la cuenca si no se hubiese actuado. En definitiva, ¿Seremos capaces de responder a esta interrogante?.

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente
2. La contaminación
3. La remediación
4. La no intervención
5. El futuro



Pues gracias a que la Junta de Andalucía dejó dos parcelas para investigación con la recubierta de lodos sin retirar, en la zona del Vado del Quema

Aznalcóllar, hoy.

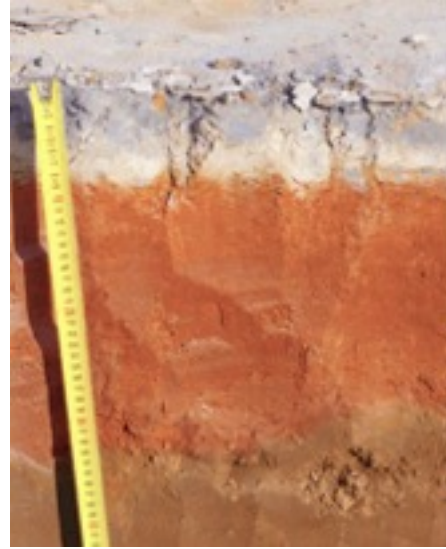
1. El accidente
2. La contaminación
3. La remediación
4. La no intervención
5. El futuro



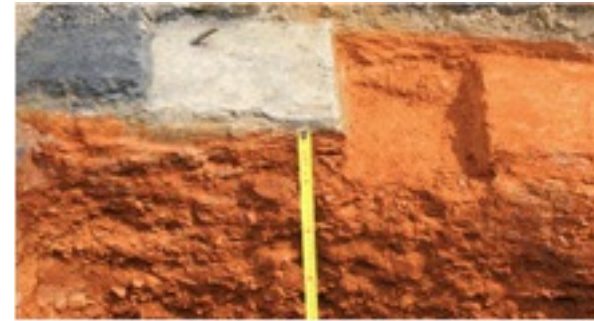
Y también nosotros al rastrear a fondo la zona hemos encontrado varios puntos aislados repartidos por la cuenca que escaparon a la retirada de los lodos. Podemos intentar responder a esta cuestión.

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro



suelo básico con carbonatos



suelo ácido sin carbonatos

- ⊙ Alteración
- ⊙ Contaminación

Tanto en los suelos básicos como en los ácidos los perfiles bajo lodos muestran una intensa modificación. Así al cabo de los 3 años aparece muy nítida una capa de color blanco en la parte superior del suelo en el contacto con la capa de lodos y debajo de esta aparece otra capa de color rojizo. Estas capas son el resultado de intensas alteraciones y contaminaciones.

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro

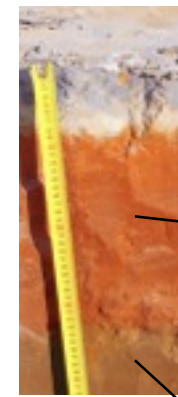


En todos estos puntos con lodos hemos realizado un muestreo sistemático de los perfiles, tomando muestras cada 1, 5, 10 y 20 cm, según la profundidad. Realizando, en algunos casos, un seguimiento desde los 2 meses hasta los 9 años.

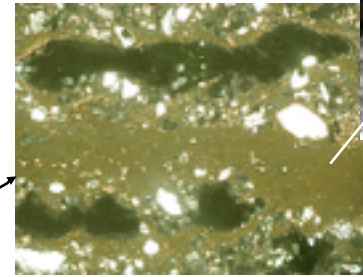
Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro

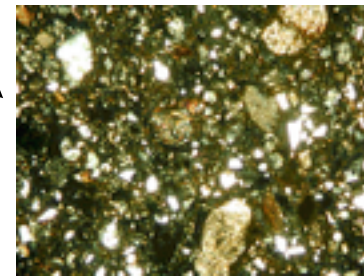
Alteración



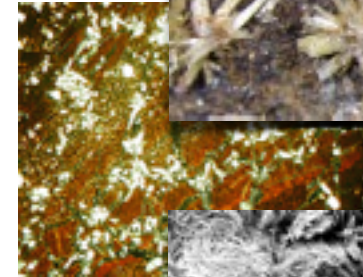
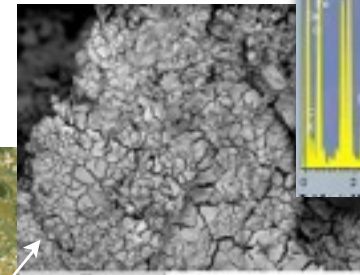
suelo con carbonatos a los 9 años



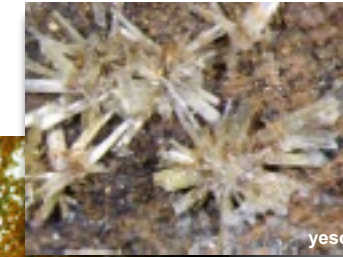
capa blanca



horiz. profundo



capa roja



yeso



hidroxisulfatos de Fe

La alteración se pone claramente de manifiesto al estudiar estas muestras.

En el fondo del perfil, a unos 70/80cm, los suelos carbonatados muestran tanto a nivel macro, en campo, como en laboratorio, al microscopio óptico, un aspecto similar al del los suelos no contaminados.

Por encima la capa acre-rojiza muestra una importante alteración. El Fe y el S de la solución contaminante precipita formando compuestos de tipo hidroxisulfatos y oxihidróxidos de color ocre-rojizo gene. mal cristalizados que agregan a los granos mine. que han resistido, en > o < grado. Tambien aparecen abundantes cristales de yeso.

En la capa más superficial, la gris-blanca la alteración es máxima. La infiltración de la sol ácida procedente de los lodos, con un pH tan bajo como 1,8 destruye totalmente a la mayoría de los minerales y aparece un residuo formando unas masas de baja cristalinidad. Como resultado de la hidrólisis mineral aparecen espacios vacíos en el suelo (en negro en la imagen) que se agrupan también horizontalmente. La estructura del suelo se destruye y adopta un tipo laminar.

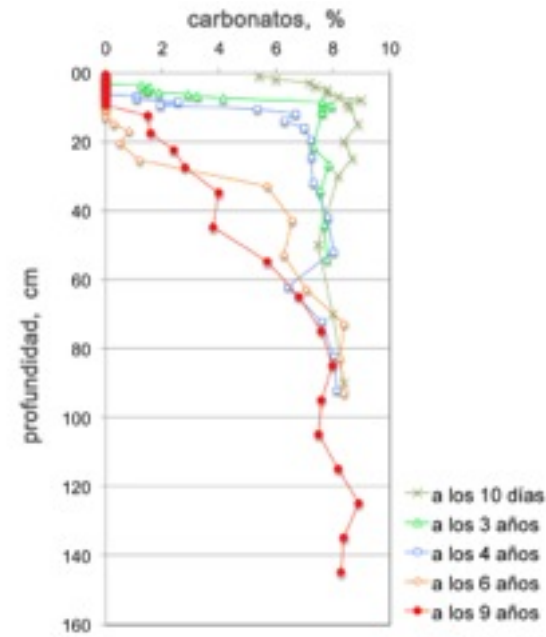
En el SEM se observa el aspecto vítreo de este residuo y el micro análisis por energías dispersivas de rayos X muestra una composición de Fe y S aportados por la sol ácida contaminante procedente de los lodos, junto a Si, Al, Mg, Ca y K procedentes de la alteración mineral.

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro

- Alteración **alteración de los minerales originales del suelo,**
horizonte más superficial de la capa roja

	Suelo no contaminado	2 meses	15 meses	4 años
carbonatos	15%	5%	0%	0%



Los carbonatos son los primeros que desaparecen. En el nivel más superficial de la capa ocre-rojiza, ya a los dos meses bajan de un 15% que tenía el suelo original a un 5%, para desaparecer por completo a los 15 meses.

Conforme va pasando el tiempo el paquete de suelo completamente decarbonatado va aumentando de espesor, la decarbonatación parcial alcanza hasta los 80 cm de profundidad a los 9 años.

• **Alteración**

alteración de los minerales originales del suelo
horizonte más superficial de la capa roja

originales
neoformados

	Suelo no contaminado	2 meses	15 meses	4 años
Cuarzo	45%	45%	45%	50%
Feldespatos	20%	20%	15%	10%
Filosilicatos	20%	20%	20%	10%
Carbonatos	15%	5%	0%	0%
Yeso	0%	5%	10%	15%
Jarosita	0%	0%	5%	15%
hidroxisulfatos de Fe	–	–	n. d.	n. d.
oxihidróxidos de Fe	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.

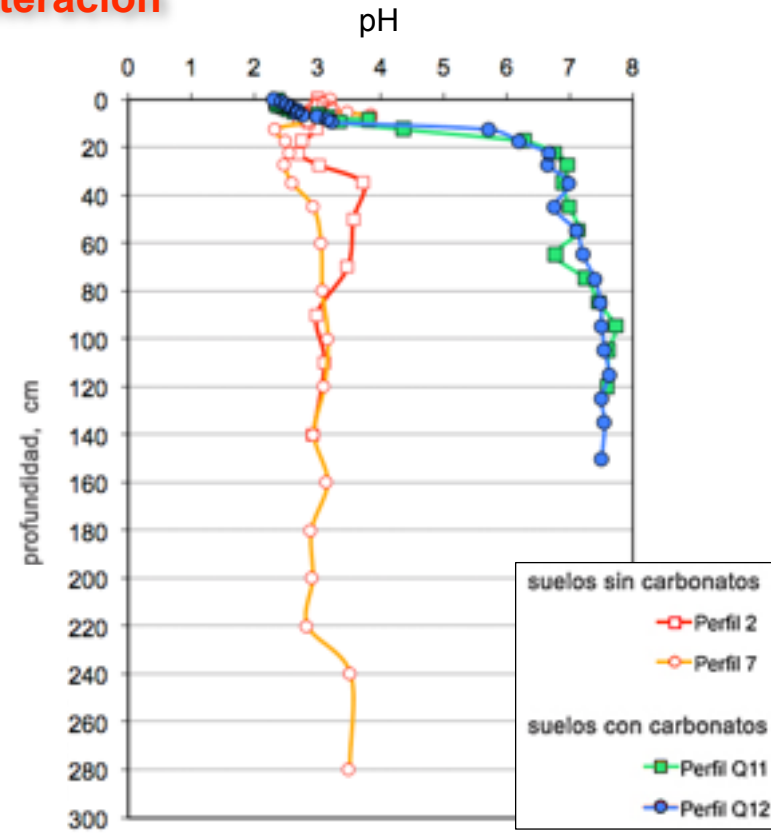
n. d. = porcentaje no determinado

En definitiva la composición mineral cambia totalmente, desaparecen los minerales del suelo original que van siendo sustituidos por minerales neoformados.

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro

Alteración



a los 9 años

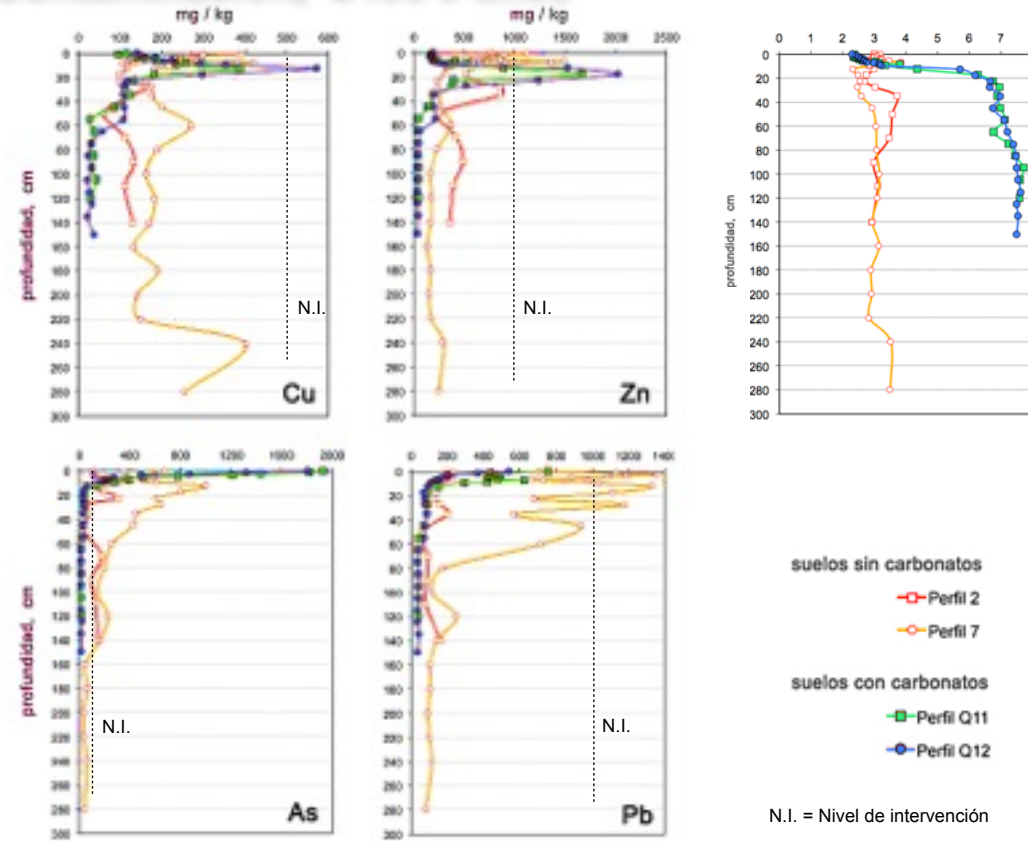
La alteración se pone también claramente de manifiesto en el pH del suelo.

Los suelos básicos, con carbonatos, (representados en azul y verde) resisten bien a la acidificación en los horizontes subsuperficiales pero experimentan una intensa acidificación en sus horizontes superficiales. Mientras que en los suelos sin carbonatos (en rojo y naranja) la extrema acidez llega hasta casi los 3 metros (la máxima profundidad de muestreo que hemos alcanzado, en un suelo a los 9 años).

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro

● Contaminación, a los 9 años



En cuanto a la contaminación en estos suelos que han conservado la capa superficial de lodos, podemos ver como es extrema, con un comportamiento muy distinto en los suelos ácidos frente a los básicos.

En los suelos sin CO₃ (con líneas roja y naranja) claramente es más intensa y profunda que los que si contienen CO₃ (líneas verde y azul). La conta en los suelos con CO₃ se concentra en los primeros cm del suelo en los que es muy intensa (en los primeros mm para el As y el Pb), en los hor de pH ácido; y como rasgo importante tenemos que la conta no sobrepasa los 60 cm de prof en las muestras de 9 años, queda pues la contaminación bloqueada en el suelo, no llega al subsuelo ni a los niveles freáticos.

Por el contrario, en los suelos sin CO₃ el As y los metales pesados llegan a alcanzar grandes profundidades y por lo que en estos suelos no remediados saldrían los contaminantes del suelo hacia el subsuelo y contaminar a las aguas freáticas.

En cuanto al grado de movilidad, el Cu parece ser el más móvil, seguido del Zn, Pb y As que parece ser el menos móvil.

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente
2. La contaminación
3. La remediación
4. La no intervención
5. El futuro



En definitiva la extrema contaminación en estos suelos con lodos hace que no haya desarrollo vegetal.

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro

Parcelas sin intervención



Nosotros para para comprobar hasta que profundidad llega la toxicidad de estos suelos en los que ha permanecido el lodo en superficie hemos llevado a cabo pruebas de toxicidad realizadas con una bacteria (VF), dos especies vegetales (L y M) y con lombrices de tierra. Un resumen de los resultados lo esquematizamos en esta imagen. En ella se observa como en la capa blanca hay una ausencia total de actividad biótica y un desarrollo biológico muy limitado en la capa roja.

Abajo, fuera de la capa roja, el suelo muestra una actividad normal.

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro

- 5 Una mirada al futuro

Y para terminar, vamos a permitirnos una mirada al futuro.

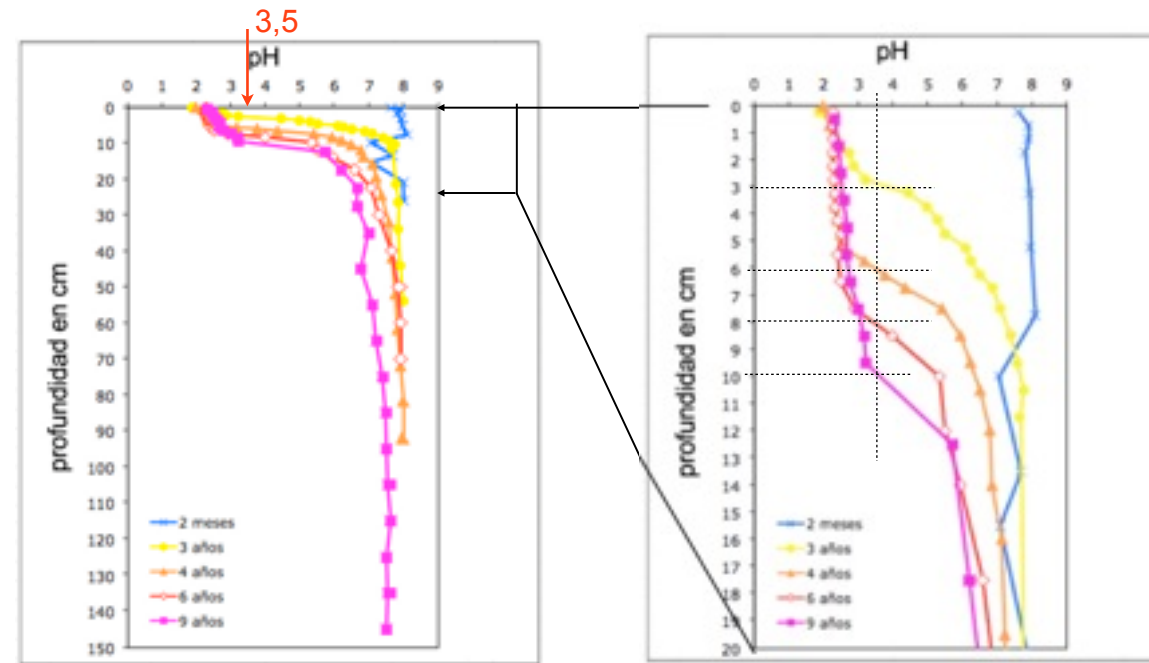
¿Qué futuro podemos esperar para la zona?

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro

Parcelas sin intervención

● Alteración



Empecemos considerando como hubiese evolucionado la zona si no se hubiese remediado.

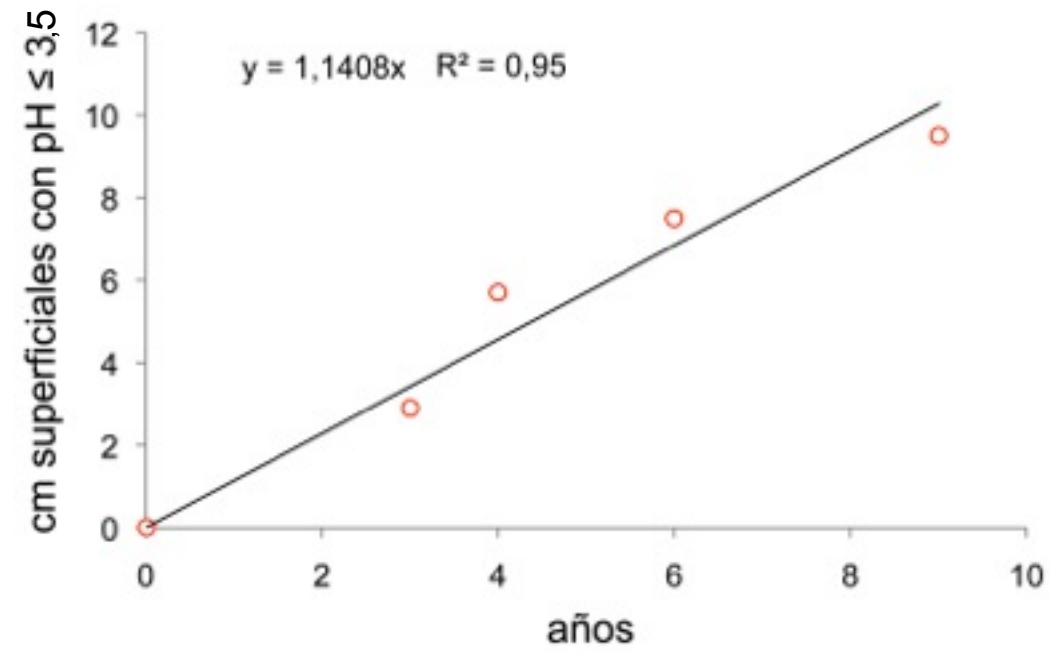
A la hora de considerar la posible fertilidad del suelo un factor decisivo lo constituye el pH del suelo.

Como hemos visto la capa superficial sufre una intensa acidificación. Podemos aceptar que por debajo de un pH de 3,5 no habrá actividad biológica. Este pH se alcanza a los 3 años en los 3 cm superficiales, se profundiza hasta los 6 cm a los 4 años, después la capa con $\text{pH} \leq 3,5$ alcanza los 8 cm a los 6 años y termina a los 9 años afectando a los 10 primeros cm.

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro

Parcelas sin intervención



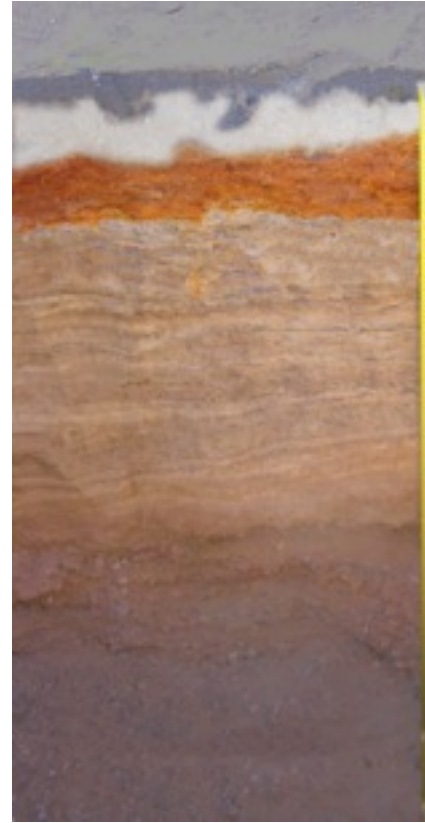
Si establecemos una ecuación de regresión entre el espesor de la capa de pH ≤ 3,5 y el tiempo, vemos que sigue una tendencia lineal, con un alto coeficiente de correlación.

Parcelas sin intervención

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro

a los 15 años
del vertido



16 cm

anulación del suelo por profundización progresiva de la capa hiperácida ($\text{pH} \leq 3,5$)

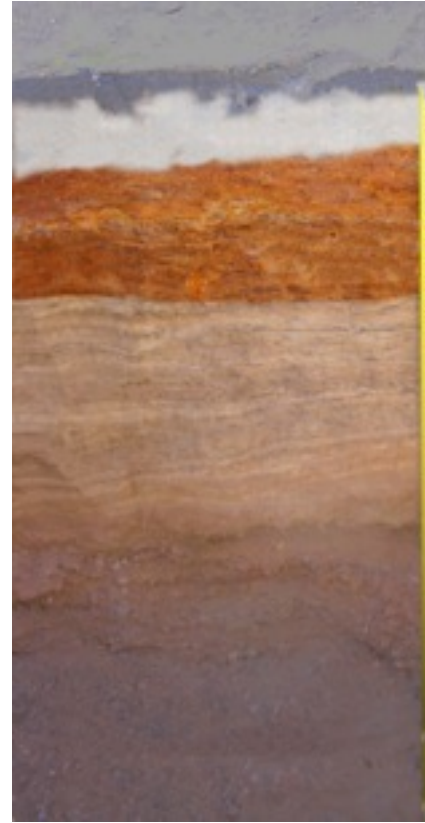
Si extrapolamos esta tendencia podríamos tener una representación similar a esta secuencia. La capa hiperácida con 16 cm en la situación actual.

Parcelas sin intervención

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro

a los 20 años



23 cm

anulación del suelo por profundización progresiva de la capa hiperácida ($\text{pH} \leq 3,5$)

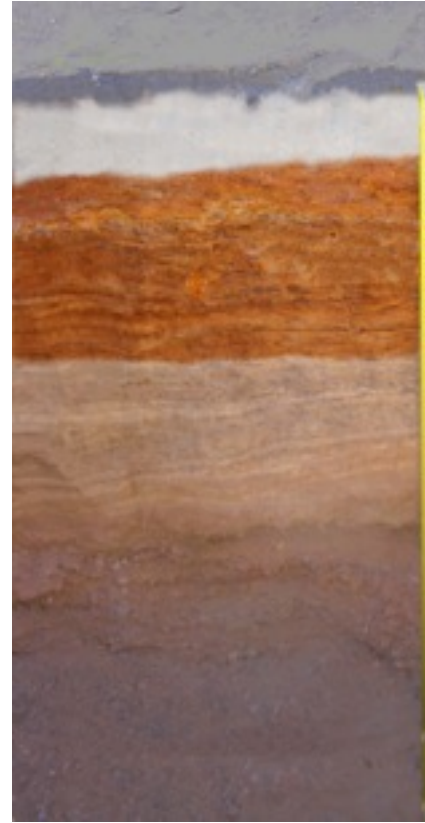
que pasaría a ser de 23 cm a los 20 años del vertido

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro

Parcelas sin intervención

a los 30 años



34 cm

anulación del suelo por profundización progresiva de la capa hiperácida ($\text{pH} \leq 3,5$)

34 cm a los 30 años

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente
2. La contaminación
3. La remediación
4. La no intervención
5. El futuro

Parcelas sin intervención

a los 40 años



46 cm

anulación del suelo por profundización progresiva de la capa hiperácida ($\text{pH} \leq 3,5$)

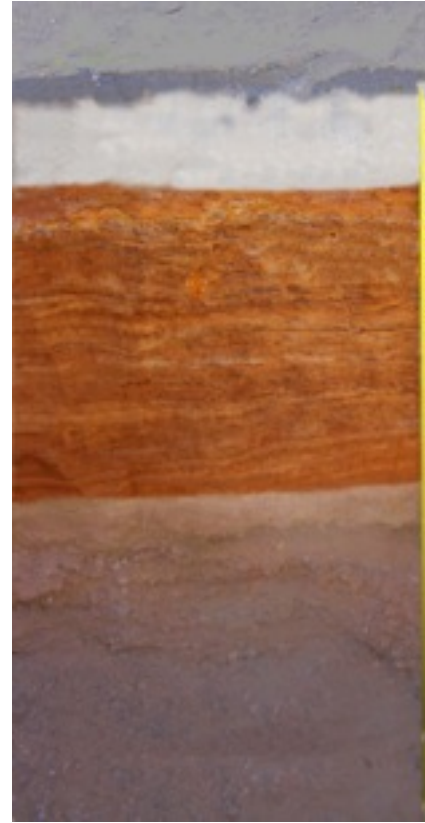
y así sucesivamente

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente
2. La contaminación
3. La remediación
4. La no intervención
5. El futuro

Parcelas sin intervención

a los 50 años



57 cm

anulación del suelo por profundización progresiva de la capa hiperácida ($\text{pH} \leq 3,5$)

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente
2. La contaminación
3. La remediación
4. La no intervención
5. El futuro

Parcelas sin intervención

a los 60 años



68 cm

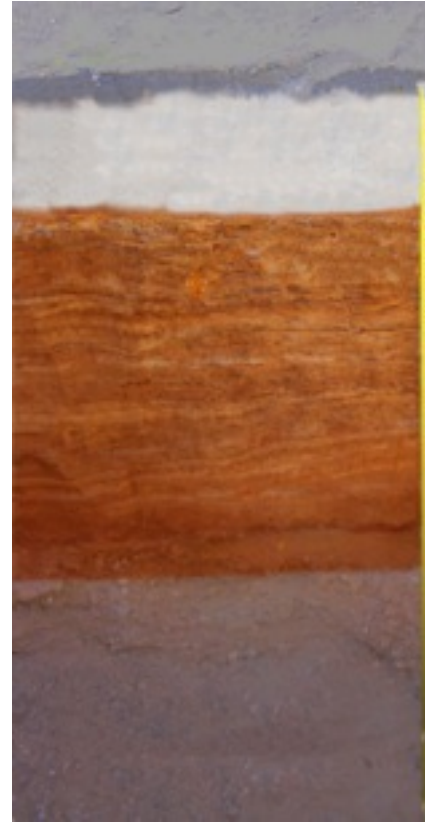
anulación del suelo por profundización progresiva de la capa hiperácida ($\text{pH} \leq 3,5$)

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente
2. La contaminación
3. La remediación
4. La no intervención
5. El futuro

Parcelas sin intervención

a los 70 años



80 cm

anulación del suelo por profundización progresiva de la capa hiperácida ($\text{pH} \leq 3,5$)

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente
2. La contaminación
3. La remediación
4. La no intervención
5. El futuro

Parcelas sin intervención

a los 80 años



91 cm

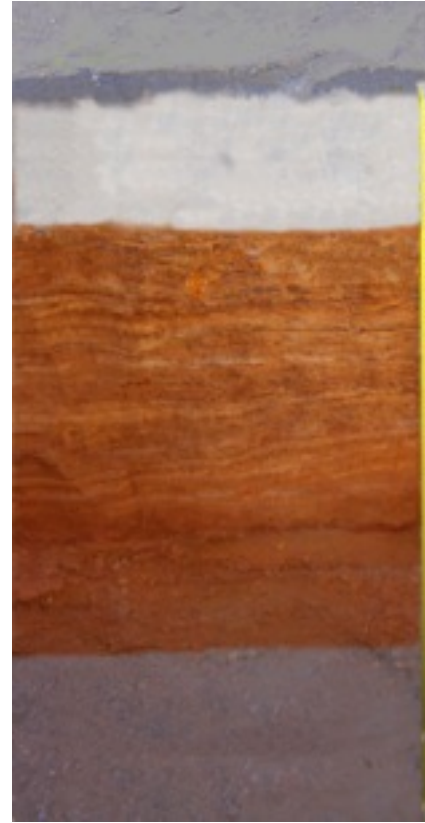
anulación del suelo por profundización progresiva de la capa hiperácida ($\text{pH} \leq 3,5$)

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente
2. La contaminación
3. La remediación
4. La no intervención
5. El futuro

Parcelas sin intervención

a los 90 años



103 cm

anulación del suelo por profundización progresiva de la capa hiperácida ($\text{pH} \leq 3,5$)

Parcelas sin intervención

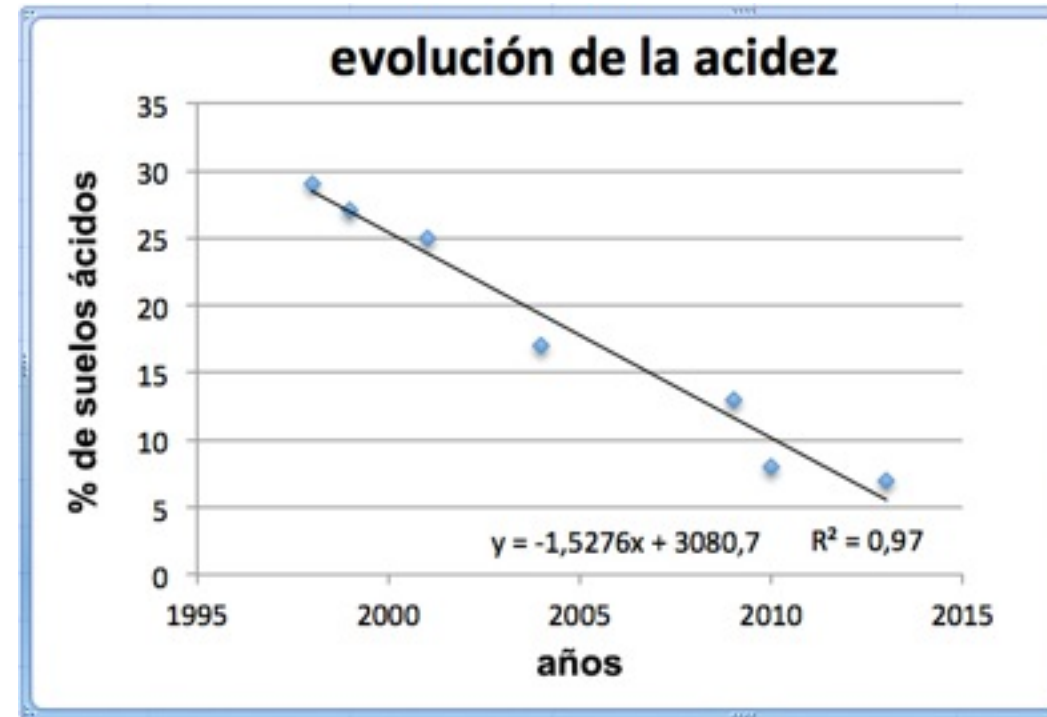


114 cm a los 100 años, o sea a los 100 años se hubiese producido la anulación de todo el espesor del suelo.
Pero no pretendo dramatizar, pues recordemos, esto hubiese ocurrido si no se hubiese procedido a la mediación de la zona.

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro

Zona remediada



muestras de 0-10 cm

En la zona remediada, fuera de las parcelas experimentales, el futuro parece muy diferente.

Como hemos visto la acidez constituye un parámetro muy eficaz para valora el grado de contaminación de estos suelos. Si recordamos en esta zona antes del vertido no había suelos ácidos, por tanto la medida de la cantidad de suelos ácidos a lo largo de estos años puede servir para valuar como ha evolucionado la degradación de los suelos. En esta gráfica representamos el número de suelos con su horizonte superficial ácido a lo largo de estos años y podemos ver que con un coeficiente de correlacion de r cuadrado de 0,97 en menos tres años, es de esperar, que no habrá ningún suelo cuyo horizonte superficial sea ácido (aunque con carácter muy local si pueden quedar algunas áreas de muy pequeña extensión con suelo ácido).

Zona remediada

		As, mg/kg				
año	edad	50 percentil	75 percentil	90 percentil	95 percentil	99 percentil
1998	0	82,1	162,6	386,7	692,4	852,8
1999	1	103,4	157,9	224,2	389,5	494,0
2001	3	68,1	112,2	203,5	284,7	486,7
2004	6	55,1	88,8	137,5	187,4	325,3
2009	11	53,7	95,9	166,2	209,6	320,8
2010	12	55,7	93,6	138,2	187,7	261,6
2013	15	35,7	59,3	94,8	109,3	149,7

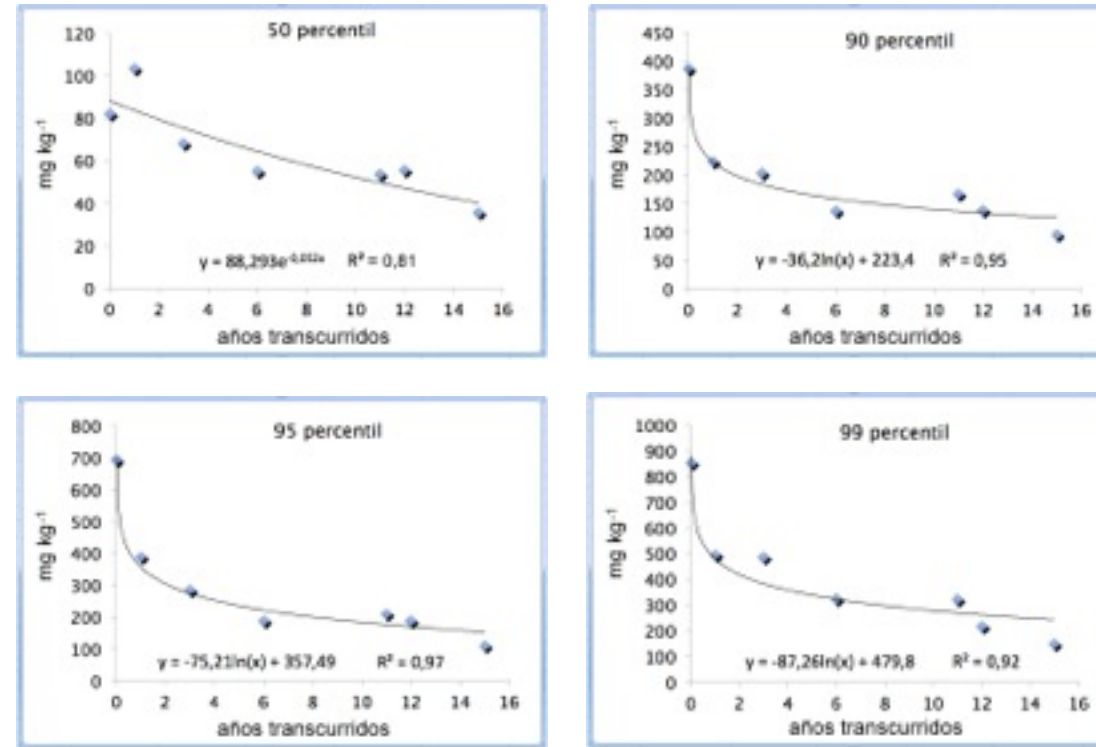
fracción total, 0-10 cm

En cuanto a la contaminación hemos visto como las concentraciones del As total y metales pesados han ido sistemáticamente decreciendo al ir transcurriendo el tiempo, siendo el As el que constituye el mayor problema. En esta tabla representamos las concentraciones en As de distintos percentiles.

Si representamos estas tendencias en una curva de regresión

Zona remediada

As, total, 0-10 cm



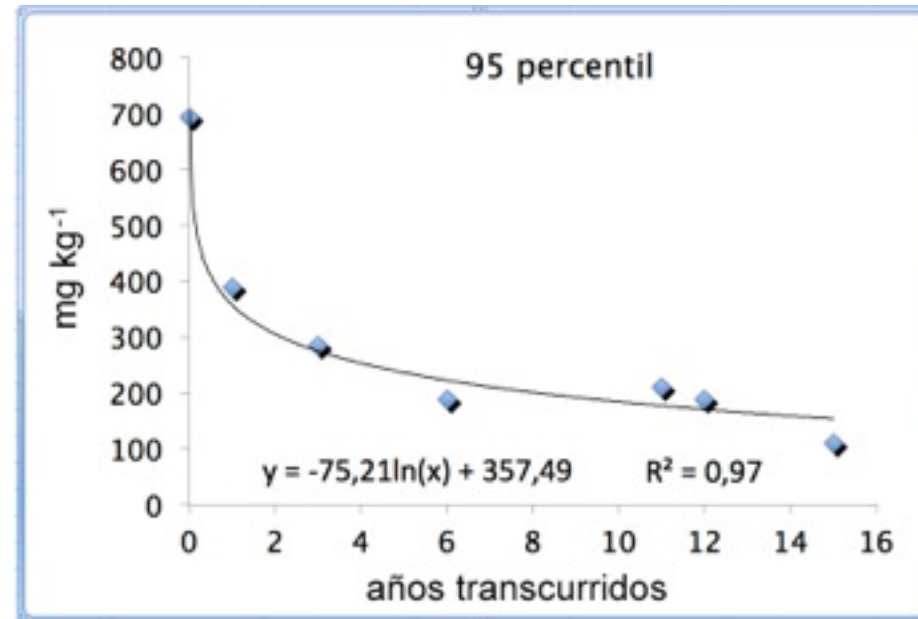
Se obtienen unas ecuaciones de regresión con unos ajustes realmente altos para los percentiles 90, 95 y 99, con un R² de 0,92 y 0,97. Estas ecuaciones nos van a permitir adentrarnos en el futuro de la zona.

Aznalcóllar, hoy.

1. El accidente 2. La contaminación 3. La remediación 4. La no intervención 5. El futuro

Zona remediada

As, total, 0-10 cm



100 mg kg^{-1} a los 31 años

18 mg kg^{-1} a los 91 años

Por ejemplo, aplicando la ecuación del percentil 95 podemos esperar que a los 31 años la concentración del 95% de los s. afectados estará por debajo del N.I. 100 mg/kg .

Y si se mantiene la tendencia actual podría ser que la zona se recupere totalmente a los 91 años del vertido, y recuperarán los valores de antes del vertido, es decir 18 mg/kg , a los 91 años.

Estos datos deben tomarse con las debidas cautelas, ¡sólo se cumplirán si se mantienen las tendencias actuales!.

Para mí es muy muy esperanzador, sinceramente me cuesta creerme que la zona vuelva a estar como antes en tan sólo 91 años pero enfin espero que Dios nos dé salud a todos para verificarlos.

AVISO. MUCHOS DE LOS DATOS AQUÍ PRESENTADOS CORRESPONDEN A INVESTIGACIONES INÉDITAS DE LOS MIEMBROS DEL DEPARTAMENTO DE EDAFOLOGÍA DE LA UNIVERSIDAD DE GRANADA QUE NO HAN SIDO AÚN PUBLICADOS.