



Descontaminación de suelos

Master en Ingeniería del Medio Ambiente Módulo Suelos

Carlos Dorronsoro Fernández
Dpto Edafología y Química Agrícola
Facultad de Ciencias. Universidad de Granada
efdorr@ugr.es
<http://edafologia.ugr.es>
<http://www.edafologia.net>



Descontaminación de suelos

Programa general

- 1 Introducción
- 2 Técnicas de anulación del suelo
- 3 Técnicas físicas y químicas
- 4 Técnicas biológicas
- Casos prácticos



Descontaminación de suelos

Programa general

- 1 Introducción
- 2 Técnicas de anulación del suelo
- 3 Técnicas físicas y químicas
- 4 Técnicas biológicas
- Casos prácticos



Descontaminación de suelos

Técnicas físicas y químicas de descontaminación del suelo

- arrastre
- lavado
- extracción química
- oxidación/reducción
- deshalogenación
- tratamiento electroquímico
- desorción térmica

Son técnicas mucho más recomendables que las descritas en el capítulo anterior ya que ahora el suelo se recupera al destruir o arrastrar a los contaminantes.



Descontaminación de suelos

Técnicas físicas y químicas de descontaminación del suelo

- Parte I
 - arrastre
 - lavado
- Parte II
 - extracción química
 - oxidación/reducción
 - deshalogenación
- Parte III
 - tratamiento electroquímico
 - desorción térmica



Técnicas físicas y químicas de descontaminación del suelo

- | | |
|-----------|---|
| Parte I | <input type="checkbox"/> arrastre |
| | <input checked="" type="checkbox"/> lavado |
| Parte II | <input checked="" type="checkbox"/> extracción química |
| | <input checked="" type="checkbox"/> oxidación/reducción |
| | <input checked="" type="checkbox"/> deshalogenación |
| Parte III | <input type="checkbox"/> tratamiento electroquímico |
| | <input type="checkbox"/> desorción térmica |



Lavado

Agua

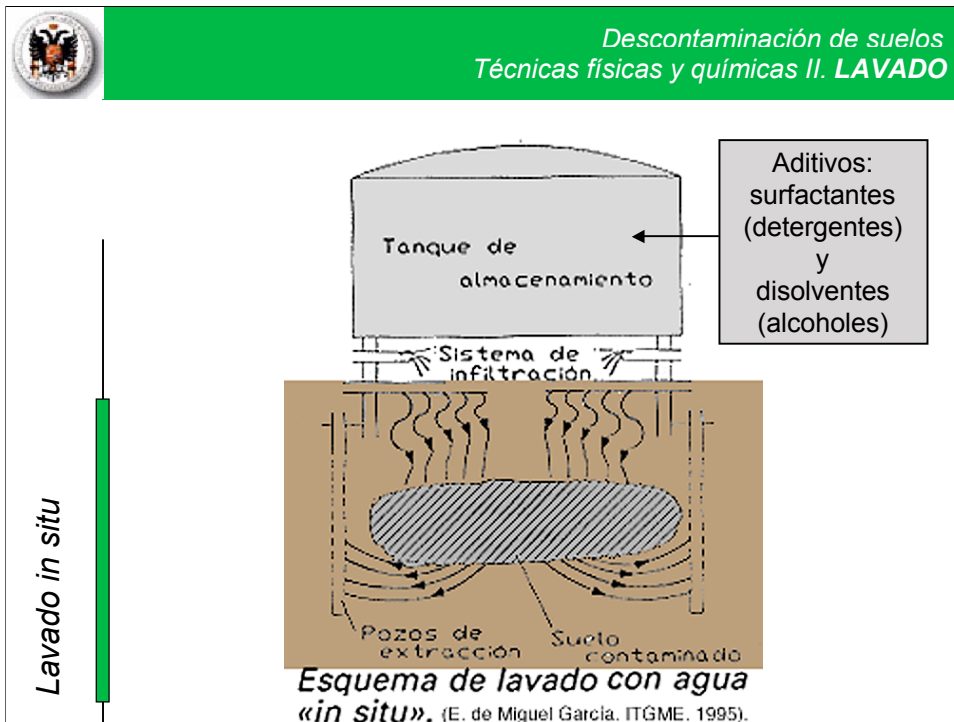
In situ y ex situ

Lavado in situ (Soil Flushing)

Descripción

Lavado in situ

Técnica de extracción de los contaminantes del suelo por la aplicación de agua.



AGUA SIN O CON ADITIVOS

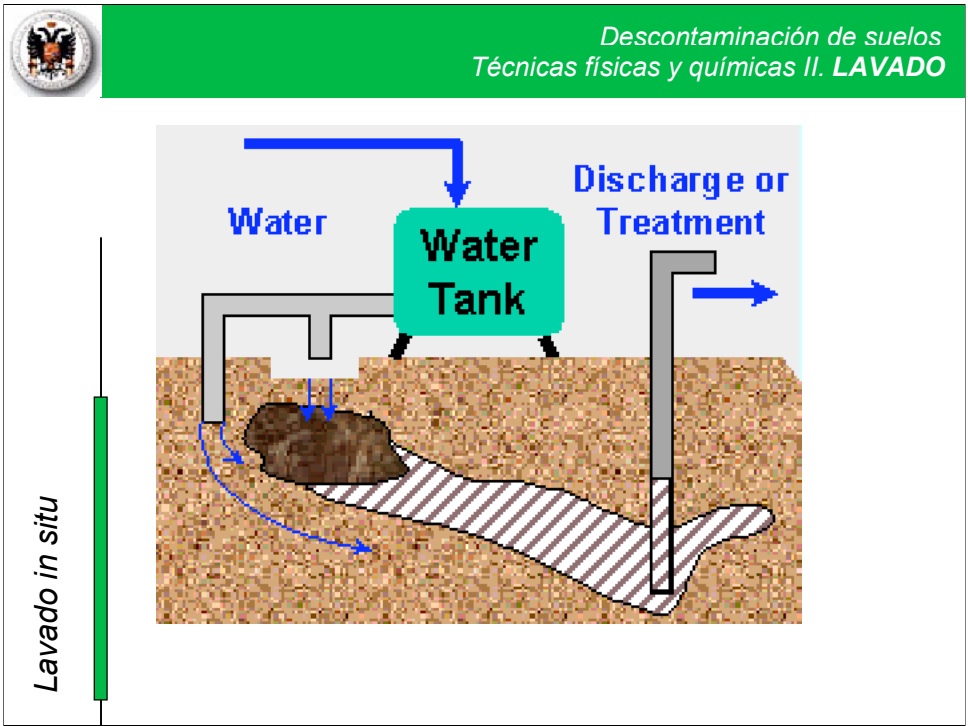
A veces el agua contiene algún aditivo para favorecer la solubilidad del contaminante.

Aditivos: surfactantes (detergentes) y disolventes (alcoholes).

La efectividad es muy dependiente del tipo de suelo y contaminantes.

Las soluciones extraídas del suelo deben ser tratadas con algún sistema de depuración para separar los contaminantes del agua con los aditivos, para su reutilización y ello representa un importante aumento de los costes.

Un inconveniente adicional es la posibilidad de que en el suelo pueda quedar un residuo del aditivo.

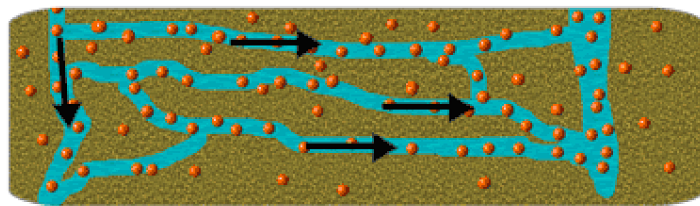


El sistema maneja gran cantidad de líquidos que deben ser tratados antes de volverlos a usar.



Lavado in situ

How to Clean Contaminated Soil



<http://home.case.edu/>

En el lavado in situ el líquido es inyectado al suelo, atraviesa su masa y se disuelven los contaminantes. Estos son arrastrados a los macroporos desde donde son bombeados a la superficie.



❑ **Aplicaciones y ventajas**

- VOCs y SVOCs solubles en agua, cianuros metálicos, disolventes nitrogenados, compuestos inorgánicos y metales pesados.



☐ Limitaciones e inconvenientes

- No utilizable en suelos de baja permeabilidad o heterogéneos.
- Los aditivos se adhieren a las partículas del suelo.
- Los contaminantes orgánicos son fuertemente adsorbidos por las arcillas.
- Los contaminantes no se destruyen.
- Los líquidos resultantes (muy abundantes) deben de ser tratados.
- En ocasiones descontaminación insuficiente.
- Se puede contaminar el suelo circundante.
- Se usa muy poco para los suelos contaminados.

Lavado in situ

-- Los aditivos (surfactantes y disolventes) se adhieren a las partículas del suelo disminuyendo la porosidad y quedan en mayor o menor cantidad retenidos en el suelo, contaminándolo.

-- Los contaminantes orgánicos son fuertemente adsorbidos por las arcillas, por lo que resultan difíciles de arrastrar.

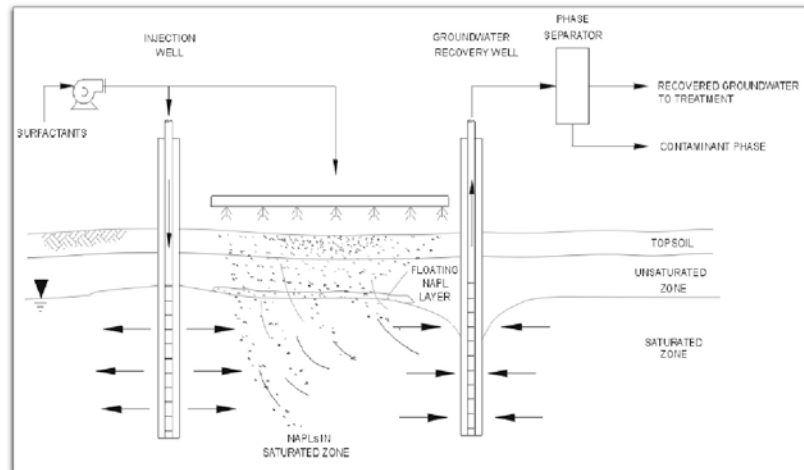
-- En ocasiones, la descontaminación conseguida por esta técnica resulta insuficiente y es necesario completar el proceso con otros procedimientos

-- Se usa muy poco para los suelos contaminados. Es muy utilizada para el tratamiento de las aguas.



Descontaminación de suelos
Técnicas físicas y químicas II. LAVADO

Lavado in situ



<http://www.usace.army.mil/>

Al inyectar agua al suelo contaminado se puede provocar la difusión de la migración a otras zonas de suelo limpio. Esto no ocurre en el caso de las aguas subterráneas.



Esta técnica requiere una alta densidad de pozos que el agua inyectado se propague por todo el suelo.



Lavado in situ


Tiempo

- De moderado a largo.

Costes


- Moderados costes, pero muy variables.
- 300 \$/m³.

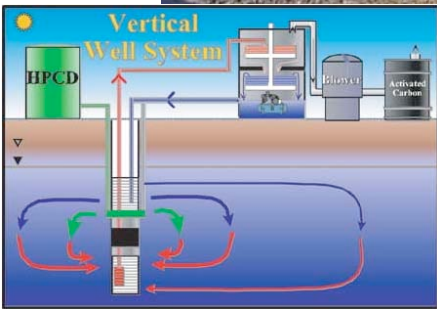
Moderados costes, pero muy variables según del tipo de contaminación, de la extensión, de la concentración y del tipo de aditivos utilizados.



Descontaminación de suelos
Técnicas físicas y químicas II. LAVADO

Lavado in situ





Aeropuerto de Tucson (USA)
Agua + ciclodextrin

<http://ag.arizona.edu/>

Esta técnica ha sido aplicada, con buenos resultados, en el Aeropuerto Internacional de Tucson (USA) para la extracción de tricloroetileno (compuesto muy cancerígeno) añadiéndole al agua un detergente (ciclodextrin; tanque “HPCD”) para facilitar la extracción.



Lavado ex situ (Soil Washing)

Lavado ex situ

- Descripción
- Localización
 - Ex situ, generalmente on site.

Igual a la técnica anterior pero ahora el suelo se excava y se lleva a una planta para su tratamiento, consiguiéndose en este caso una limpieza mucho más completa y rápida.

Los contaminantes pueden ser arrastrados por disolución, pero también en suspensión.

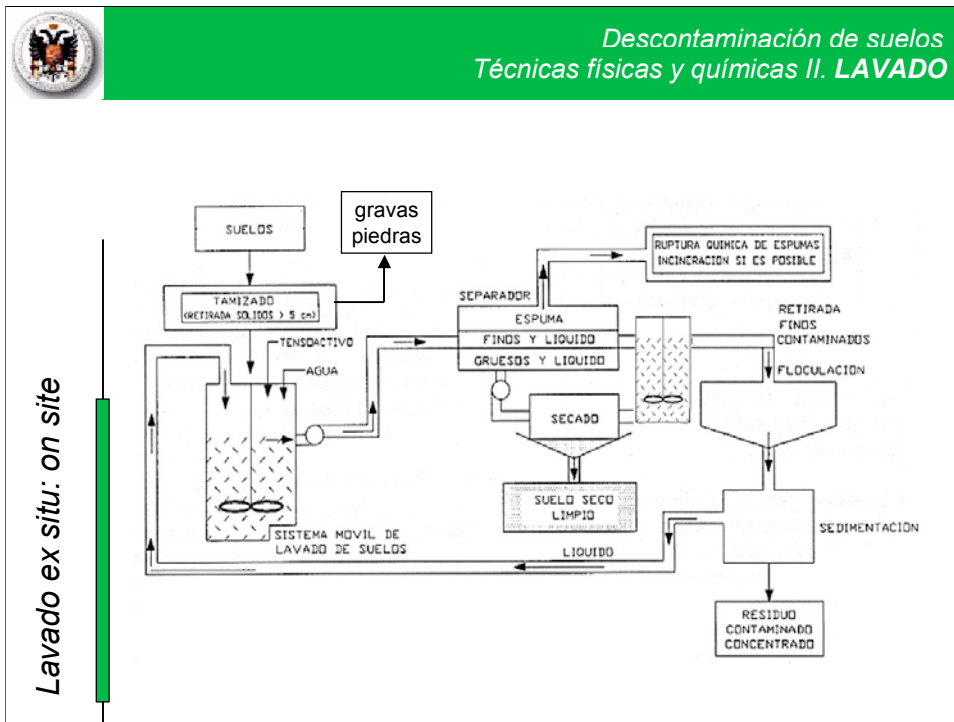


Lavado ex situ: on site



<http://www.art-engineering.com>

Normalmente se trabaja on site



El suelo se excava y se lleva a una planta (frecuentemente on site) donde primero se homogeneiza y luego se separa por tamaños y se trata en un sistema de lavado. La separación por tamaños se realiza para facilitar las labores de limpieza pues los contaminantes se unen preferentemente a la fracciones finas, arcillas y limos, y con mucha menor intensidad a las arenas. Así las arcillas y los limos se lavan más intensamente y si es necesario se repiten los lavados.

El proceso combina la separación por disolución y flotación por un lado y por otro, para los contaminantes pesados por gravedad. Se trata de una técnica muy experimentada en minería.



Lavado ex situ: on site

Aplicaciones y ventajas

- Contaminantes solubles en agua.
- Mucho más energético.
- Utilizable para cualquier tipo de suelos (no necesitan ser permeables).
- Procedimiento moderadamente utilizado.

-- El proceso de lavado es mucho más energético (mezclado, agitación, tamizado y tratamiento selectivo) que en el tratamiento in situ con lo que se consigue una descontaminación mucho más intensa y rápida.

-- Utilizable para cualquier tipo de suelos (no necesitan ser permeables).



Lavado ex situ: on site

Limitaciones e inconvenientes

- Con la materia orgánica y los contaminantes orgánicos
- Mezclas complejas.
- Los contaminantes no se destruyen.
- Los líquidos resultantes abundantes.

Tiempo. De corto a moderado (semanas o meses).

Costes. Moderados, 300 \$/m³.

- Suelos con alto contenido en materia orgánica requieren tratamiento previo.
- Los contaminantes orgánicos son fuertemente adsorbidos por las arcillas, por lo que resultan difíciles de eliminar.
- Para mezclas complejas de contaminantes hay que programar unos lavados secuenciales.
- Los líquidos resultantes son abundantes y deben de ser finalmente tratados.

Costes. Moderados, 300 \$/m³, incluyendo excavación.

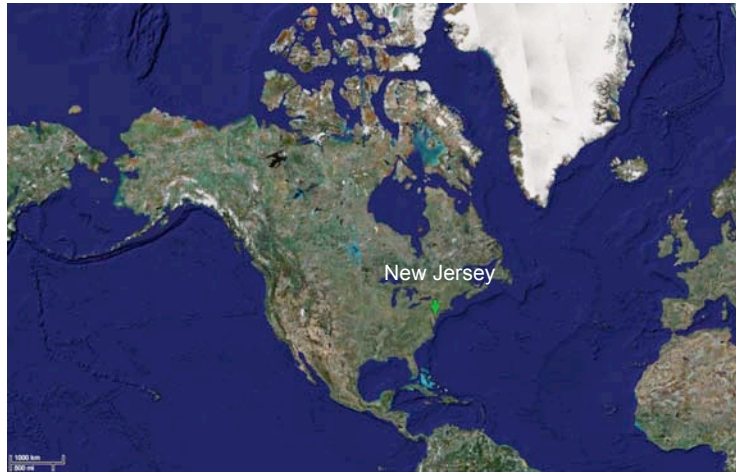


Lavado ex situ: on site. King of Prussia

Un caso práctico

Situación inicial

Localización. New Jersey (USA).





Lavado ex situ: on site. King of Prussia

Localización. King of Prussia Technical Corporation,



King of Prussia Technical Corporation, Winslow Township (municipio), New Jersey (USA).

Reciclado de residuos industriales y su transformación en productos para la construcción.



Lavado ex situ: on site. King of Prussia

Descontaminación de suelos
Técnicas físicas y químicas II. LAVADO

Situación inicial

Origen de la contaminación

56.781 m³ de residuos en seis lagunas

En 1990 se decreta la intervención,

se excava los suelos

completa extracción de los depósitos de las lagunas.

Contaminantes

Suelos con altas concentraciones de metales pesados:

Cr, Cu y Ni.

Como resultado de la actividad industrial de la King of Prussia Technical Corporation, un total de 56.781 m³ de residuos fueron almacenados en seis lagunas, pasando con el tiempo a contaminar a los suelos de la zona. En 1990 se decreta la intervención, excavándose los suelos y procediéndose a la completa extracción de los depósitos de las lagunas.



Propuestas de remediación

Se proponen las siguientes seis alternativas:

1. No acción.
2. Limitada acción (cercado zona e intensas restricciones de uso).
3. Excavación de suelos, sedimentos y lodos. Recubrimiento y consolidación en vertedero local.
4. Excavación de suelos, sedimentos y lodos. Transporte y almacenamiento off site en un vertedero.
5. Establecimiento de concentraciones máximas permisibles. Excavación de suelos, sedimentos y lodos. Extracción de contaminantes mediante lavado on site. Reposición en el sitio y restitución de la topografía original.
6. Estabilización/solidificación de suelos, sedimentos y lodos. Recubrimiento.



Propuestas de remediación

Se proponen las siguientes seis alternativas:

1. No acción.
2. Limitada acción (cercado zona e intensas restricciones de uso).
3. Excavación de suelos, sedimentos y lodos. Recubrimiento y consolidación en vertedero local.
4. Excavación de suelos, sedimentos y lodos. Transporte y almacenamiento off site en un vertedero.
5. Establecimiento de concentraciones máximas permisibles. Excavación de suelos, sedimentos y lodos. Extracción de contaminantes mediante lavado on site. Reposición en el sitio y restitución de la topografía original.
6. Estabilización/solidificación de suelos, sedimentos y lodos. Recubrimiento.

Alternativa elegida: nº 5



Lavado ex situ: on site. King of Prussia

Situación inicial

Contaminantes

	En lodos de las lagunas	Máximas conc. en suelos del sitio	Media en los suelos del sitio
Cu	16.300	9.070	860
Cr	11.300	8.010	660
Ni	11.100	387	330
Pb	389	NA	22

Los valores están expresados en mg/kg.

En menores cantidades se encuentran Hg, As, Be, Zn, Cd, Se y Ag.

NA = No analizado

y menores cantidades de Hg, As, Be, Zn, Cd, Se y Ag.



Lavado ex situ: on site. King of Prussia

Situación inicial

Contaminantes

	En lodos de las lagunas	Máximas conc. en suelos del sitio	Media en los suelos del sitio	Valores normales en suelos	Niveles de referencia para parques	Niveles de intervención en parques
Cu	16.300	9.070	860	10-30	100	500
Cr	11.300	8.010	660	20-100	100	500
Ni	11.100	387	330	10-35	100	750
Pb	389	NA	22	10-30	200	1.000

Los valores están expresados en mg/kg.

En menores cantidades se encuentran Hg, As, Be, Zn, Cd, Se y Ag.

NA = No analizado

Se supera el Nivel de referencia en, aprox., número de veces, casi:

Cu 90 máx., 8 media; Cr 80 máx. y 6 media; Ni 4 máx. y 3 media;

Pb medias por debajo del Nivel de Referencia.



Lavado ex situ: on site. King of Prussia

Situación inicial

Área contaminada

4 hectáreas, rodeadas de un denso bosque de pinos de uso recreativo.



Areal Project View



Lavado ex situ: on site. King of Prussia

Descontaminación de suelos
Técnicas físicas y químicas II. **LAVADO**

Tratamiento

Técnica. Lavado ex situ (on site).

Procedimiento

Delimitación de los suelos contaminados con un equipo de fluorescencia de rayos-X.

Se excavaron unas 36.000 tn de suelo, pero sólo necesitaron limpiarse 18.144 tn.

Para la selección de los sitios contaminados se efectuó una intensa campaña de campo con un equipo de fluorescencia de rayos-X portátil.

Los suelos fueron excavados hasta que se encontraron suelos limpios con el equipo de rayos-X portátil y fueron llevados a una planta de descontaminación.



Lavado ex situ: on site. King of Prussia

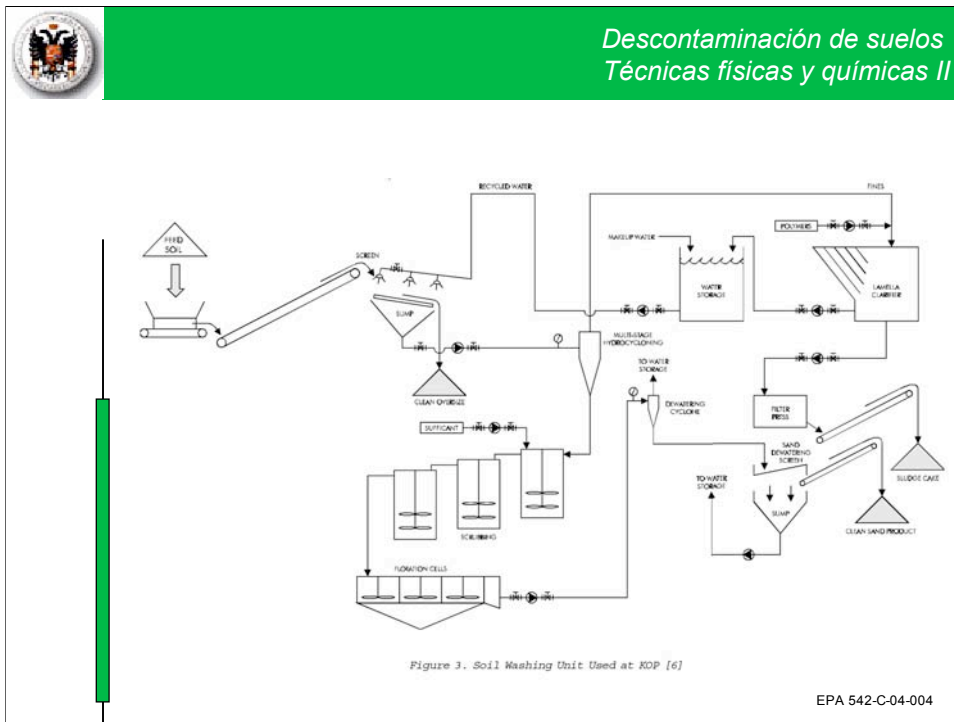
Tratamiento



www.art-engineering.com

Areal Project View





Esquema de este sistema de lavado.

Se distinguen 4 etapas: tamizado, separación, flotación y manejo del residuo de lodos.

Velocidad del tratamiento 25 t/hora.

TAMIZADO. Separación en una tolva de los fragmentos gruesos del suelo (>20cm; piedra y ramas) (no representado en la figura). El material que pasa a través del tamiz es transportado a otro tamiz vibratorio de una luz de malla de 5 cm, el material fino se lleva a un tamizado en húmedo para desagregar los terrones. Al agua se le añade un detergente para desprender los contaminantes de la superficie de las gravas. El material que no pasa a través del tamiz, las gravas, son añadidas al material grueso previamente separado (>20 cm).

SEPARACIÓN. El material fino, en suspensión y sobretodo en forma de lodo, es introducido en un sistema múltiple de hidrociclones que consigue separar las arenas de las partículas más finas (limos y arcillas) con una eficacia >99%.

FLOTACIÓN. El material que cae al fondo de los recipientes pasa a un sistema de flotación (inyección de aire en el medio acuoso) en el que se separan los contaminantes (atrapados en la espuma) de las partículas gruesas.

Las partículas gruesas son desecadas en un equipo dotado de un ciclón desecador y almacenadas.

MANEJO DE LOS LODOS. Los materiales finos son conducidos a unos hidrociclones y sistemas clarificadores para separar los materiales finos del medio acuoso: Se pasan a través de unos filtros, se recoge el lodo y se comprime para reducir su volumen del orden del 50% y almacenarlo en un vertedero.

El agua se recicla introduciéndola nuevamente en el sistema.



Descontaminación de suelos
Técnicas físicas y químicas II. **LAVADO**

Lavado ex situ: on site. King of Prussia

<http://www.art-engineering.com/>

En esquema, los suelos excavados fueron llevados a una planta de descontaminación levantada en el mismo lugar (on site). Las muestras se sometieron a una criba por tamaños, pasando después al baño de lavado, condicionadores y unidades de flotación.

El suelo tratado (sólo constituido por fragmentos gruesos) se volvió a depositar en la zona de extracción.



Lavado ex situ: on site. King of Prussia

Descontaminación de suelos
Técnicas físicas y químicas II. **LAVADO**


Tratamiento

Características del suelo. 13% gravas, 92% arenas; pH 6,5.

Total de suelo tratado. 18.144 tn.

Duración de la operación. 4 meses (marzo-junio 1993).

Costes. 7.700.000 \$. Coste unitario de 800 \$/m³



Descontaminación de suelos
Técnicas físicas y químicas II. LAVADO

Lavado ex situ: on site. King of Prussia

Resultados

Constituent	Cleanup Level (mg/kg)	Untreated Soil Concentration (mg/kg)		Clean Sand Product Concentration (mg/kg)		Sludge Cake Average Concentration (mg/kg)	Efectividad limpieza %
		Average	Range	Average	Range		
Chromium	483	660	500 to 5,000	73	37 to 94	4,700	88,9
Copper	3571	860	800 to 8,000	110	52 to 158	5,900	87,2
Nickel	1,935	330	300 to 3,500	25	18 to 38	2,300	92,4

N/A - Samples were not collected - see text.
ND - Not detected (detection limit shown in parentheses)

Cr, Cu, Ni Nivel de intervención para parques 500 mg/kg

EPA 542-C-04-004

Cr normal 20-200; Nivel intervención parques 500

Cu normal 10-30; Nivel intervención parques 500

Ni normal 10-35; Nivel intervención parques 500

UNTREATED SOIL - Representa el suelo antes de cualquier tratamiento.

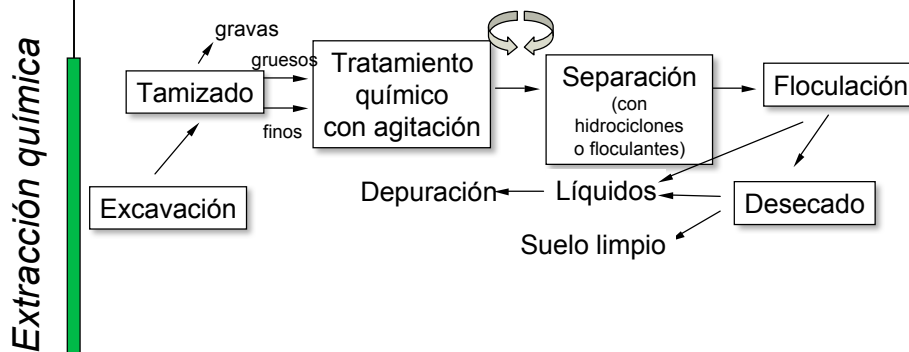
CLEAN SAND PRODUCT - Representa al suelo tratado y vuelto a colocar en el sitio.

SLUDGE CAKE - Concentraciones en el residuo del tratamiento (pasta de lodo) y llevado a un vertedero.



Extracción química

□ Descripción



Los reactivos químicos no destruyen a los contaminantes solo los disuelven. Por tanto se origina un residuo con los contaminantes concentrados que deben ser tratados o almacenados.

Duración del tratamiento de 10 a 40 minutos.

Los dos agentes extractantes: ácidos (clorhídrico) y disolvente orgánicos apolares (en este caso no es el agua el vehículo de transporte como en el caso de lavado). Se trata una técnica ex situ que consta de agitación, separación por hidrociclones, floculación (añadiendo Cl_2Mg , CaCO_3 , cal, NaOH) y posterior desecado.



Descripción

- Extracción por ácidos y por reactivos orgánicos.

Localización

- Técnica ex situ (on site y off site).

Aplicaciones y ventajas

- Contaminantes orgánicos, VOCs / SVOCs (PCBs, combustibles derivados del petróleo) y metales pesados.
- Fácil manejo.
- Tratamiento completo.
- Cualquier tipo de suelos.

-- Fácil manejo (suelo en planta de tratamiento), situación controlada, condiciones prefijadas, estándares.

-- Tratamiento completo: mezclado, agitación, tamizado y tratamiento selectivo.

-- Para cualquier tipo de suelos (no necesitan ser permeables).



Limitaciones e inconvenientes

- Los contaminantes orgánicos y las arcillas.
- Altos contenidos en materia orgánica.
- Reactivos químicos utilizados.
- Neutralizar la acidez resultante.
- Los contaminantes no se destruyen.
- Técnica moderadamente utilizada.

Tiempo. Moderado tiempo de ejecución.

Costes. Moderados a altos, 200-800 \$/m³.

-- Los contaminantes orgánicos son fuertemente adsorbidos por las arcillas, por lo que resultan difíciles de eliminar.

-- Altos contenidos en materia orgánica requieren tratamiento previo.

-- Los reactivos químicos utilizados pueden por si solos crear problemas de toxicidad.

-- Con la extracción ácida hay que finalmente neutralizar la acidez resultante.

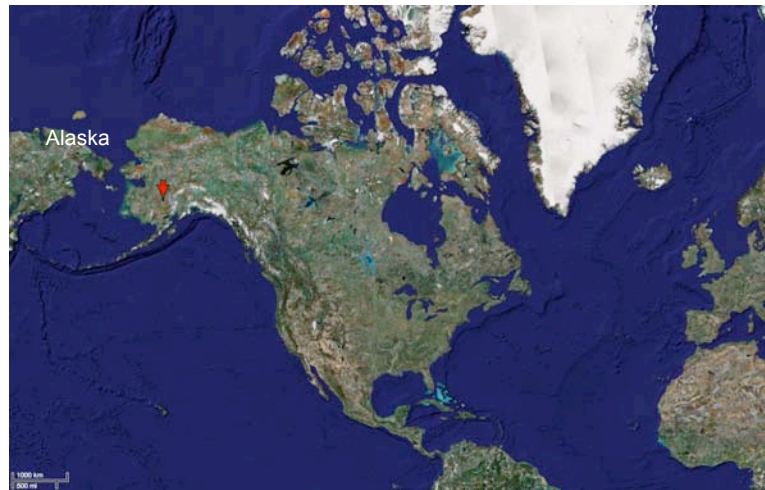


Un caso práctico

Un caso práctico: Sparrevohn

Situación inicial

Localización. Alaska (USA).





Se trata de un estación de radar construida en 1952 perteneciente a la red de diez estaciones de radar para la defensa y protección del territorio americano. Se encuentra situada a, aproximadamente, 322 Km de Anchorage. Es únicamente accesible por aire por la US Air Force.



Situación inicial

Un caso práctico: Sparrevohn

Localización. Sparrevohn Long Range Radar Station, Alaska (USA).

Origen de la contaminación.

Descubrimiento 1986

1.000 toneladas métricas de PCBs.

Remediación 1996.

Contaminantes.

PCBs halogenados semivolátiles de 5 a 500 mg/kg en los suelos, con una media de 80 mg/kg.

Área contaminada.

Unas 1.000 t

En 1986 se descubrió una contaminación del suelo de aproximadamente 1.000 toneladas métricas de PCBs. Procediéndose en el verano de 1996 a su remediación.

PCB = (Polychlorinated biphenyls) Bifenilos policlorados

Nivel Genérico de Referencia para PCBs (BOE 18/01/05):
0,8 mg/kg para uso industrial; 0,08 urbano; 0,01 agrícola



Tratamiento

Técnica.

Extracción química con disolventes on site.

Procedimiento.

Dos zonas.

Parte baja de la colina.

Máximas 0,1 a 11.358 mg/kg de PCBs en suelos.

Se excavó el suelo (410 tn) y se llevaron a un vertedero off site.

Parte alta de la colina.

Máximas de 5 a 500 mg/kg de PCBs; media 80 mg/kg.

Se excavaron 550 tn. y se trataron por extracción química on site.

Se eligió la extracción por solventes frente a otras posibles tecnologías, como la desorción térmica o el lavado del suelo, por ser la que mejor se adaptaba a las operatividad en un sitio tan remoto y aislado (menos equipamiento y menor cantidad de materiales -fuel, agua y electricidad-; y menos riegos, el tratamiento térmico podría inducir la formación de dioxinas y furanos).

Nivel Genérico de Referencia para PCBs (BOE 18/01/05):
0,8 mg/kg para uso industrial; 0,08 urbano; 0,01 agrícola



TREATMENT SYSTEM DESCRIPTION (1,3)

Un caso práctico: Sparrevohn

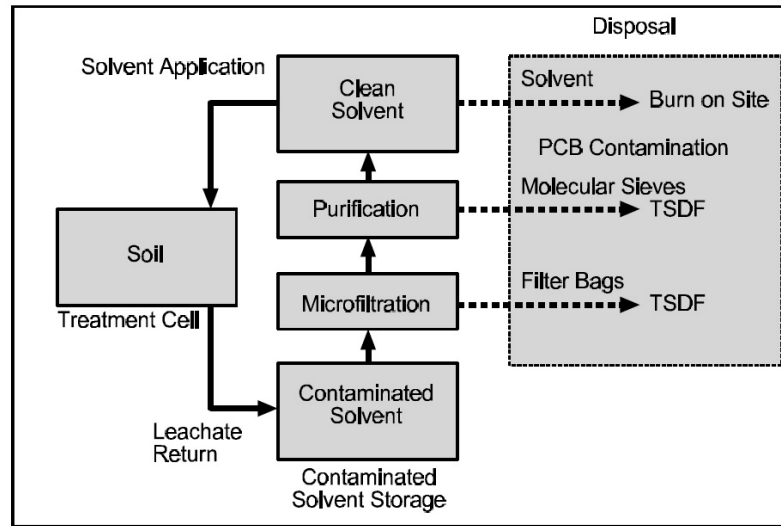
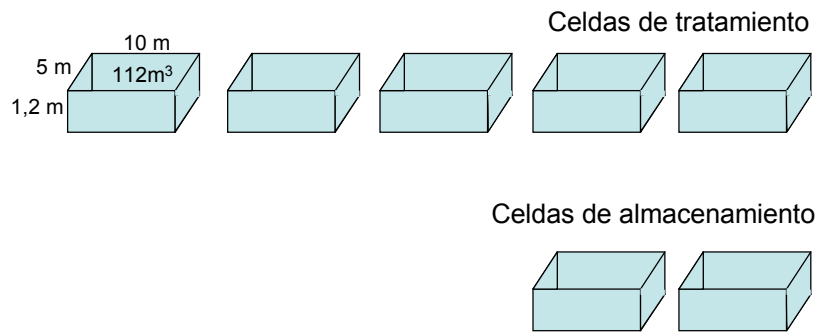


Figure 2. Process Flow Diagram (1) (TSDF) treatment, storage, and disposal facility

El sistema elegido constaba de los siguientes procesos.



Un caso práctico: Sparrevohn



Se excavaron cinco celdas de tratamiento y dos de almacenamiento (solvente limpio y contaminado) de unos 100 m³ con la paredes recubiertas por membrana impermeables

Se construyeron con un sistema de drenaje para recoger los PCBs.

Recubierta superior para evitar evaporación y preservar del agua de lluvia

Cada celda se relleno de suelo y disolvente, permaneciendo en contacto durante 24 horas. La operación se repitió durante ocho sesiones.

Después se drenó la mezcla contaminante / suelo / disolvente y se transfirió a la celda de almacenaje de la cual se separó el disolvente mediante una célula de tamizado molecular.

El suelo tratado de la celda se extrae y se rellena con otro suelo contaminado para proseguir el tratamiento.

El suelo tratado se le añaden nutrientes y microorganismos para que biodegraden el disolvente residual que puede quedar en el suelo.



Tratamiento

Características del suelo.

Textura gruesa, con gravas y sin apenas arcilla;
humedad < 9%.

Total de suelo tratado. 954 m³.

Duración de la operación. 2 meses.

Costes. El coste total del tratamiento fue de 828.179\$.

Con un coste unitario de 593\$/m³ de suelo tratado.



Resultado final

Objetivos

Los objetivos del tratamiento:

15 mg/kg de PCBs para el suelo tratado

2 mg/L de PCBs en el líquido de extracción.

Resultados



Descontaminación de suelos Técnicas físicas y químicas II. **EXTRACCIÓN QUÍMICA**

Table TPD-1. Solvent Extraction Treatment Performance Data, Sparrevohn LRRS [1]

Parameter	Cell 1	Cell 2	Cell 3	Cell 4	Cell 5
PCB Concentration, mg/kg					
Untreated Soil (composite, average)*	80	80	80	80	80
Treated Soil (immunoassay procedure)	<10	<10	<10	<10	<10
Treated Soil (composite from top)	0.55	0.95	3.15	0.98	6.48
Treated Soil (composite from bottom)	0.68	0.99	2.19	8.84	7.88
Treated Soil (Average)	3.27				

* Concentration of 80 mg/kg in untreated soil, on the basis of average of results for eight individual composite samples, as follows: 346, 41, 13, 52, 59, 60, 40, and 28 mg/kg.

Un caso práctico: Sparrevohn

EPA 542-C-04-304

Resultados.

PCBs antes 80 mg/kg de media; tratados 3,3 mg/kg (96% de eficacia).

La cantidad de contaminantes extraídos: 15 kg

Una vez limpiados los disolventes sus concentraciones de PCBs quedaron por debajo de los límites de detección (0,1 mg/L).

La cantidad de contaminantes extraídos de los suelos se calculó en 15 kg.

15 mg/kg de PCBs para el suelo tratado

2 mg/L de PCBs en el líquido de extracción para poder ser eliminado mediante combustión



Oxidación/reducción

In situ y ex situ

In situ

Descripción

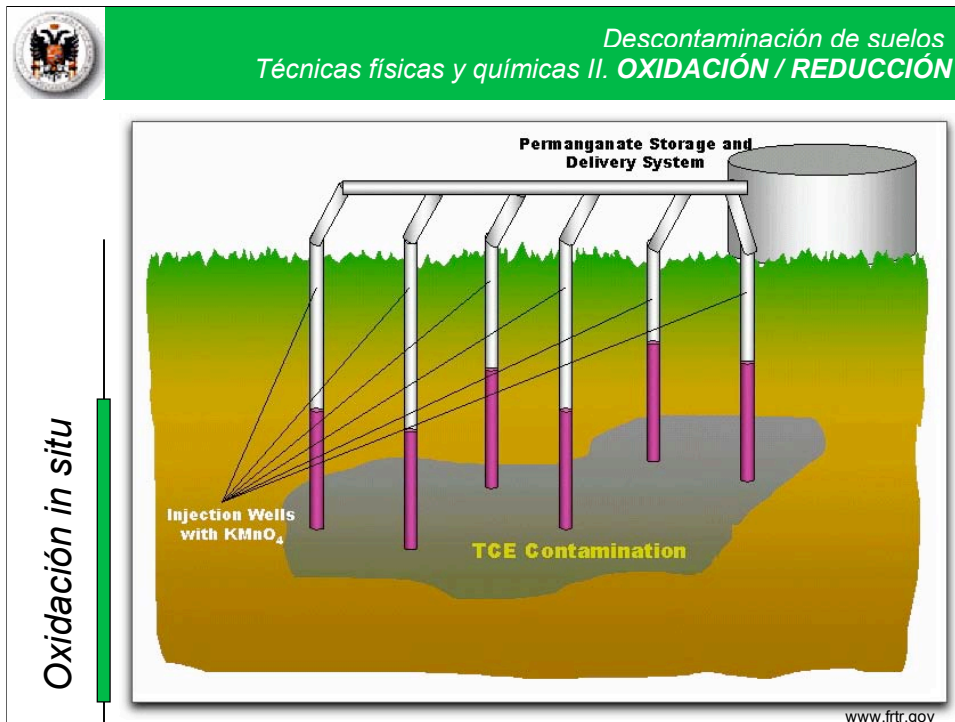
Destrucción química de los contaminantes orgánicos por oxidación (lo más frecuente) o por reducción.

- Reactivos oxidantes: permanganato, agua oxigenada, ozono, hipocloritos, cloro y dióxido de cloro.
- Reactivos reductores: H₂S, sulfato ferroso y sulfuro de calcio.

Oxidación in situ

Transformación de los contaminantes por oxidación o reducción a sustancias menos tóxicos, menos móviles o inertes.

Reacciones redox envuelven transferencia de electrones; unos materiales son oxidados al perder electrones a costa de otras sustancias que se reducen al ganar electrones.



Los agentes oxidantes pueden causar la descomposición de los contaminantes orgánicos en cuestión de minutos y con una eficacia > 90%. El resultado final de este proceso es mineralizar a los contaminantes orgánicos a CO₂ y agua.

Los reactivos oxidantes son diversos:

O₃. Ozono. Actúa muy rápidamente y su acción es más rápida en suelos ácidos. Su descomposición in situ puede oxigenar el suelo y producir bioestimulación.

H₂O₂. La oxidación puede realizarse mediante la utilización de agua oxigenada (H₂O₂). El agua oxigenada junto a hierro ferroso constituye el reactivo de Fenton que actúa como un poderoso oxidante que degrada rápidamente a los contaminantes orgánicos. El reactivo de Fenton es muy efectivo en condiciones muy ácidas (pH de 2 a 4) y se vuelve inactivo bajo condiciones de alcalinidad moderadas a fuertes. El agua oxigenada en presencia de hierro ferroso (Fe₂⁺) reacciona dando radicales hidroxilos (OH•), hierro férrico (Fe₃⁺) e iones hidroxilos (OH⁻). Estos iones hidroxilos son fuertemente oxidantes y pueden romper los enlaces hidrocarbonados de los constituyentes del petróleo, como el benceno, tolueno, etilbenceno y xileno y también ataca a los hidrocarburos aromáticos (PAHs) y al MTBE (methyl tertiary butyl ether), un aditivo común de las gasolinas.

Permanganato. Normalmente se usa permanganato de K, pero también puede ser de Na, Ca o Mg. Las reacciones de oxidación del KMnO₄ son mucho menos energéticas y más lentas que las de los dos reactivos anteriores, aunque su rango de actuación es mucho más amplio (pH de 3,5 a 12), también tiene la ventaja de no produce calor ni vapores y al estar más tiempo en el suelo permite una mayor infiltración y un mayor tiempo de contacto con los contaminantes.



❑ **Aplicaciones y ventajas**

- Buenos resultados con los derivados del petróleo.
- Contaminantes orgánicos, VOCs, SVOCs, compuestos orgánicos con comportamiento iónico, aldehídos, ácidos orgánicos, fenoles, cianuros, combustibles, pesticidas, herbicidas y plaguicidas organoclorados.
- Capaz de destruir compuestos orgánicos recalcitrantes.
- Los contaminantes se destruyen.
- . Apenas utilizado en suelos.

-- Capaz de destruir compuestos orgánicos recalcitrantes con otras técnicas.

-- Muy utilizado para aguas subterráneas pero apenas en suelos.



Limitaciones e inconvenientes

- Se puede producir coloides y gases tóxicos.
- Consume gran volumen de agentes oxidantes.
- Resultados muy defectuosos en suelos poco porosos.
- Se necesita de otras tecnologías.

Tiempo

- Muy rápido, de semanas a meses.

Costes

- Costes altos.

- La destrucción de los contaminantes puede producir coloides que reducen la porosidad del suelo.
- Durante la oxidación se pueden producir gases tóxicos.
- Se necesita de otras tecnologías (extracción de vapores).



Oxidación/reducción ex situ.

Descripción

Destrucción química de los contaminantes orgánicos por oxidación y por reducción.

Reactivos oxidantes: permanganato, agua oxigenada, ozono, hipocloritos, cloro y dióxido de cloro.

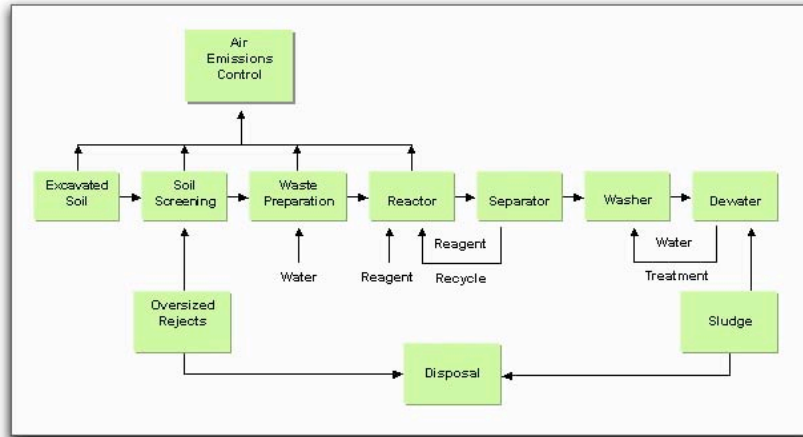
Reactivos reductores: sulfato ferroso, bisulfito e hidroxisulfito sódicos.

A diferencia del procedimiento in situ con este proceso ex situ sí se puede provocar la destrucción de los contaminantes mediante la REDUCCIÓN, además de por oxidación.



Descontaminación de suelos
Técnicas físicas y químicas II. **OXIDACIÓN / REDUCCIÓN**

Oxidación / reducción ex situ



www.ftr.gov



□ **Aplicaciones y ventajas**

- Como el tratamiento in situ.
- Reducción: inorgánicos, metales pesados y cianuros.
- Capaz de destruir compuestos orgánicos recalcitrantes.
- Los contaminantes se destruyen.
- Apenas aplicado a suelos.

-- Como el tratamiento in situ: utilizado para los derivados del petróleo y VOCs y SVOCs halogenados y no halogenados.

-- Con la reducción se obtienen buenos resultados para compuestos inorgánicos, metales pesados y cianuros.

-- Técnica capaz de destruir compuestos orgánicos recalcitrantes con otras técnicas.

-- Muy poco utilizado para aguas subterráneas y apenas aplicado a suelos.



Limitaciones e inconvenientes

- Se pueden producir gases tóxicos.
- Suelos con intensa contaminación requieren grandes consumos.

Tiempo

- Procedimiento de corto a medio plazo de ejecución.

Costes

- De moderados a altos costes, de 190 a 660 \$/m³.

-- Durante las reacciones de oxidación se pueden producir gases tóxicos.

-- La técnica no resulta rentable para suelos con intensa contaminación debido al gran consumo de agentes oxidantes y reductores.



Deshalogenación (Dehalogenation)

Deshalogenación

Descripción

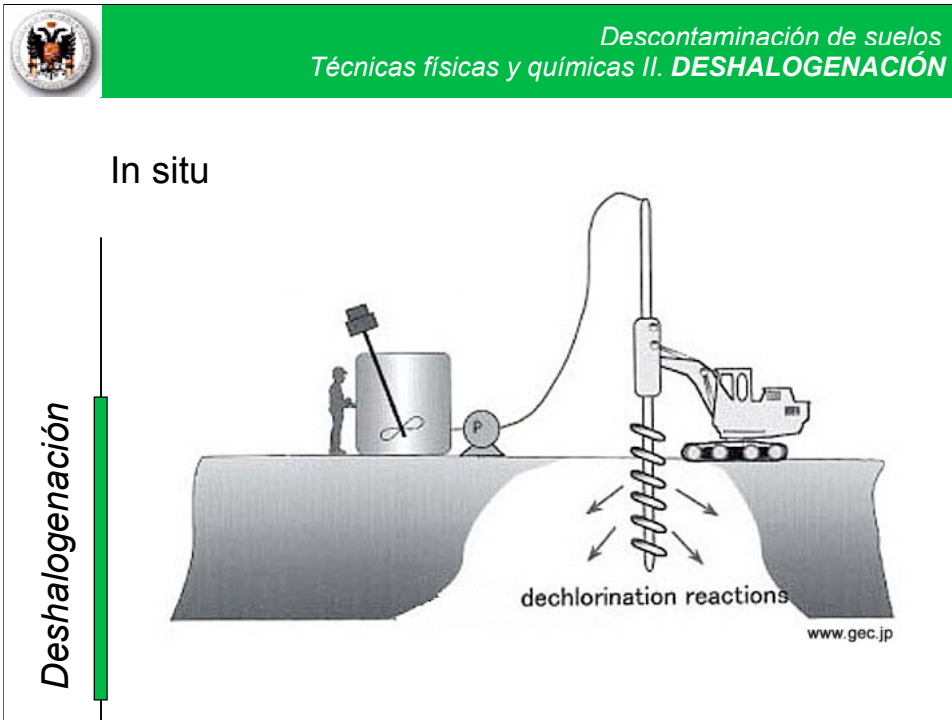
Destrucción de los compuestos halogenados por reacción con determinados agentes (bicarbonato sódico y polietilenglicol).

Localización

Técnica in situ y ex situ

Los mecanismos de ataque pueden ser por: reemplazamiento de las moléculas halogenadas, por volatilización parcial o por descomposición total.

Los contaminantes halogenados, pueden contener diversos halógenos, como fluor, cloro, bromo, yodo, pero generalmente se trata de cloro.



IN SITU

Se mezcla el agente deshalogenante en el suelo junto a nutrientes. Al aumentar la actividad microbiana por los nutrientes se produce un elevado consumo de oxígeno (por la respiración de los organismos) originándose un ambiente fuertemente reductor que provoca la descloración de los compuestos orgánicos por reacciones químicas y microbiológicas.

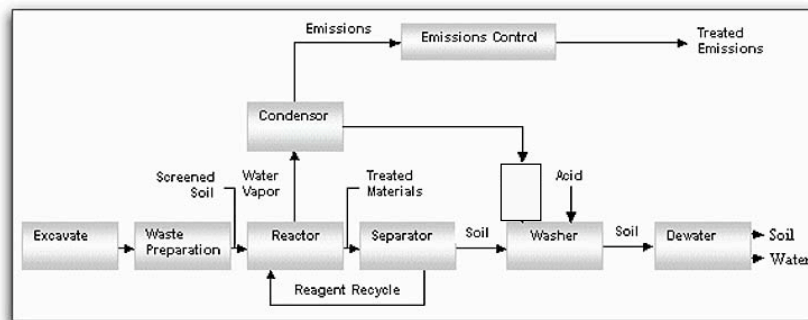


ON SITE



Ex situ: off site

Deshalogenación



www.ftr.gov

El suelo es tamizado para retirar los fragmentos gruesos, luego se mezcla y tritura con el agente deshalogenador (bicarbonato sódico y polietilenglicol) en un reactor y se calienta (por encima de 330°) para producir la volatilización de los contaminantes clorados. Luego estos se condensan, se recogen y se tratan.

Finalmente se lava el suelo, se seca y se devuelve al sitio original.



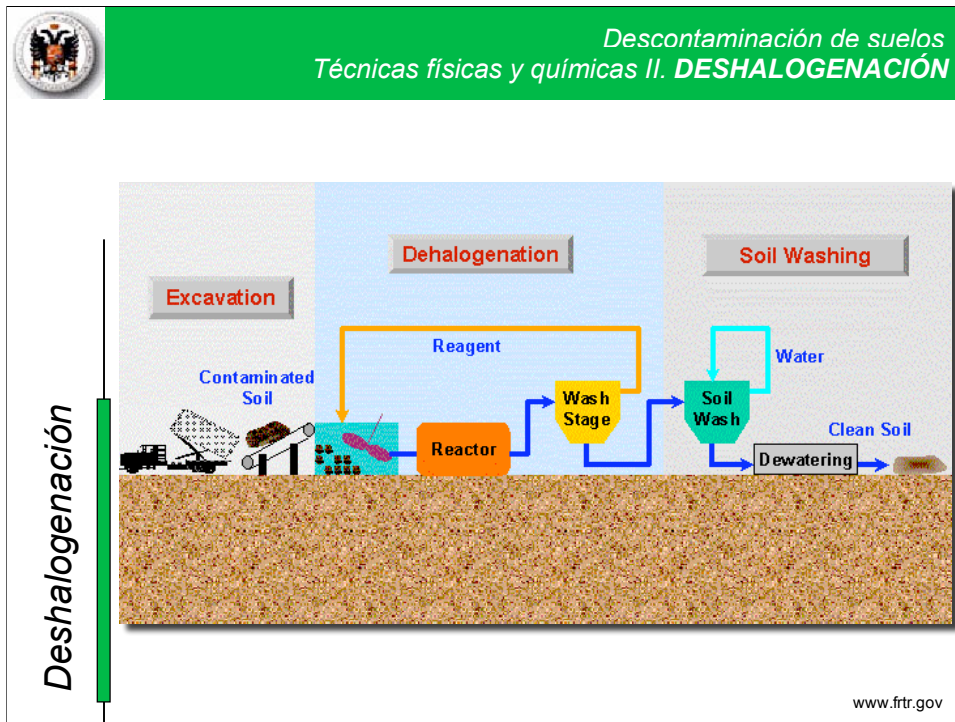
Aplicaciones y ventajas

- Elimina VOCs, SVOCs, PCBs, dioxinas, furanos, hidrocarburos clorurados y pesticidas.
- Para VOCs halogenados recalcitrantes (PCBs).
- Los contaminantes se destruyen.

Limitaciones e inconvenientes

- Suelos arcillosos con excesivos costes.
- Se requieren normalmente grandes cantidades de reactivos.
- En muy raras ocasiones como técnica independiente.

- Esta técnica es capaz de destruir VOCs halogenados que son recalcitrantes para otras técnicas.
- La deshalogenación con polietilenglicol es una de las pocas técnicas (además de la incineración) capaces de destruir con efectividad a los PCBs.
- Suelos con altos contenidos en arcillas incrementa excesivamente los costes.
- Concentraciones de compuestos orgánicos clorados > 5% requieren grandes cantidades de reactivos.
- Utilizada en muy raras ocasiones como técnica independiente, generalmente acompañada de la desorción térmica o del lavado del suelo.



Generalmente esta tecnología requiere de un tratamiento final de lavado por agua y secado.

El suelo excavado es transportado a la planta de descontaminación. La deshalogenación se lleva a cabo en un reactor en el que se mezcla el suelo con los agentes químicos. Una vez terminado el proceso de deshalogenación se recoge el exceso de reactivo y se recicla enviándolo nuevamente al reactor. El proceso termina acoplando una tecnología de lavado del suelo por agua para remover los posibles contaminantes residuales. Con lo que el suelo queda preparado para llevarlo nuevamente a su posición inicial.



Deshalogenación

Tiempo

- Procedimiento de corto a medio plazo.

Costes

- De moderados a altos, de 220 a 550 \$/m³.

De moderados a altos, de 220 a 550 \$/m³, aparte de las movilizaciones de tierra y el transporte.