



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
efdorron@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



Descontaminación de suelos

Técnicas físicas y químicas de descontaminación del suelo

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



Tratamiento electroquímico (Electrokinetic Remediation)

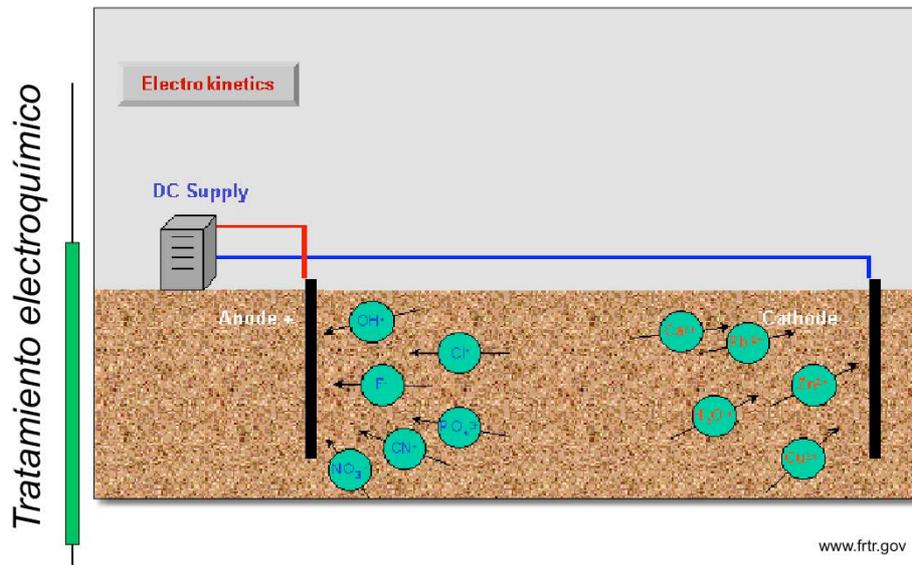
Descripción

Extracción de contaminantes (con comportamiento iónico) mediante un campo eléctrico.

Localización

Técnica in situ.

La remediación electrocinética o electrorremediación es una tecnología innovadora que puede utilizarse para la remediación in situ de suelos contaminados con metales o compuestos orgánicos polares; es una técnica aplicable principalmente a suelos de baja permeabilidad.



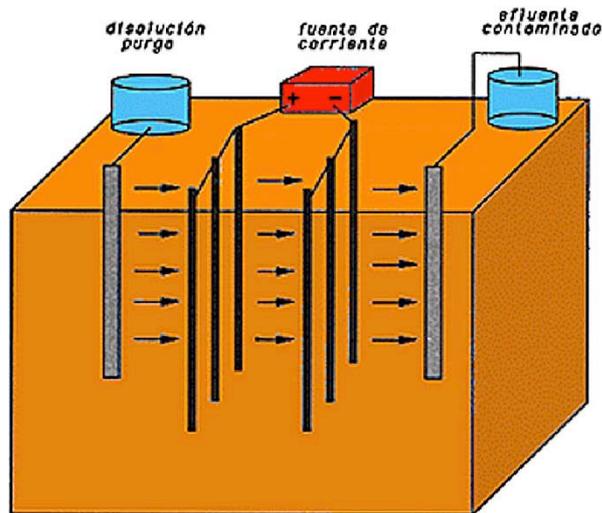
Se introducen unos electrodos en el suelo contaminado, se crea una diferencia de potencial de bajo voltaje entre ellos, se origina un campo eléctrico y los contaminantes polares son arrastrados en este campo eléctrico. Los contaminantes con carga negativa (cloro, cianuro, fluoruro, nitratos y determinados compuestos orgánicos) se pegan al ánodo (electrodo de signo +) mientras que los de comportamiento positivo (el amonio y otros cationes y compuestos orgánicos cargados positivamente) se concentra en el cátodo (de signo negativo) y pueden ser extraídos fuera del suelo.

Ánodo (+); cátodo (-).

Esta técnica requiere una alta densidad de la instalación. Hay que ir poco a poco barriendo la zona.



Tratamiento electroquímico



Esquema del proceso de electroremediación.
(X. Domenech, 1995).

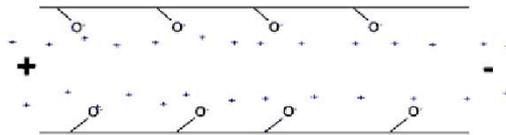
La diferencia de potencial entre los electrodos es muy baja para esta técnica, del orden de unos pocos voltios por cm, y así se crea un campo eléctrico de bajo voltaje (miliamperes por cm^2).

Para la extracción de los contaminantes pegados a los electrodos se utiliza una corriente de agua.



Mecanismos de transporte de contaminantes

Tratamiento electroquímico



Electromigración

Electroósmosis

Electroforésis

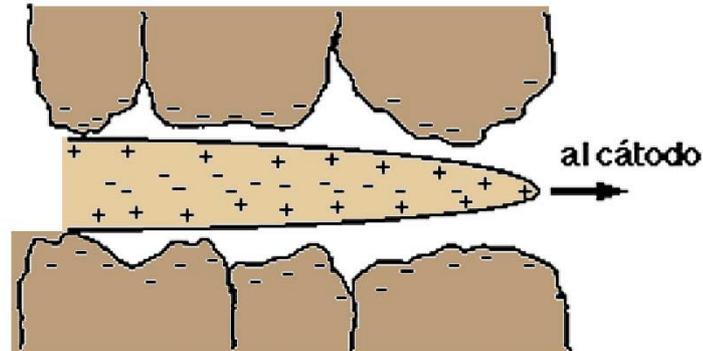
<http://electrochem.cwru.edu/>

Ánodo (+); cátodo (-).

La aplicación de un gradiente de potencial en un suelo húmedo, da como resultado el transporte de iones en un líquido (electro-migración; movimiento de especies cargadas eléctricamente hacia el electrodo de signo contrario), el transporte del agua de solvatación de dichos cationes (electro-ósmosis; flujo neto de agua inducido por el campo eléctrico, debido a la formación de una doble capa eléctrica entre la superficie cargada de las partículas y los iones disueltos o los dipolos del solvente).



Tratamiento electroquímico



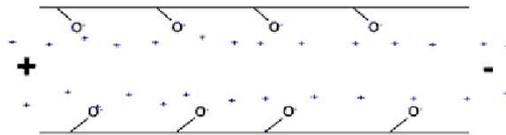
Transporte de materia a través de los poros mediante electroósmosis (X. Domenech, 1995)

Electroósmosis. Movimiento de un líquido a través de los tubos capilares del suelo debido a una diferencia de potencial. La electroósmosis es el movimiento de un líquido que contiene iones. Cuando se aplica un campo eléctrico al suelo el agua del suelo se mueve entre los electrodos.



Mecanismos de transporte de contaminantes

Tratamiento electroquímico



Electromigración

Electroósmosis

Electroforésis

<http://electrochem.cwru.edu/>

Ánodo (+); cátodo (-).

Al arrastre mecánico de partículas en suspensión y de grandes moléculas orgánicas se le llama electroforesis.

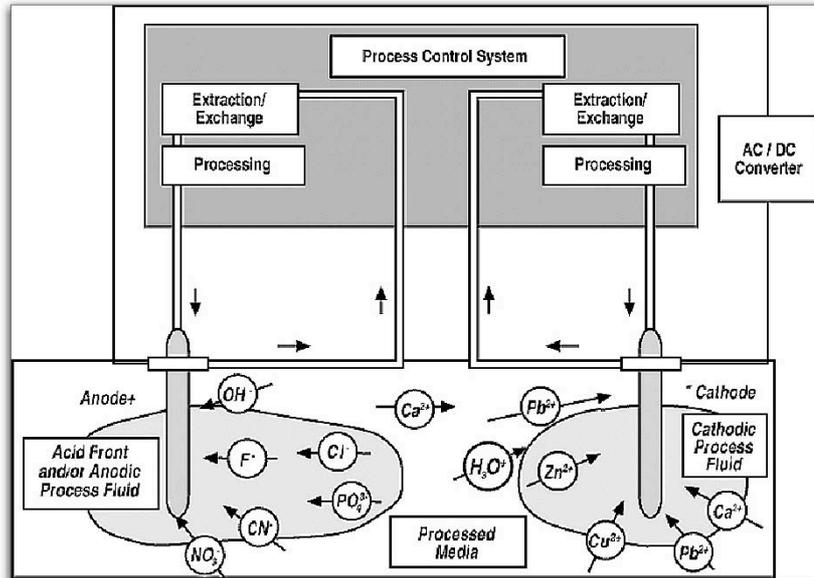
La electro-migración es el mecanismo principal durante la electrorremediación. La dirección y velocidad de movimiento de una especie iónica depende de su carga (magnitud y polaridad) y de la magnitud de la electro-ósmosis inducida por la velocidad del flujo. Las especies orgánicas o inorgánicas no cargadas también pueden movilizarse debido al fenómeno electro-ósmotico causado por el flujo del electrolito.

La extracción de los contaminantes se realiza a partir de los electrodos.



Descontaminación de suelos
Técnicas físicas y químicas III. TRAT. ELECTROQUÍMICO

Tratamiento electroquímico



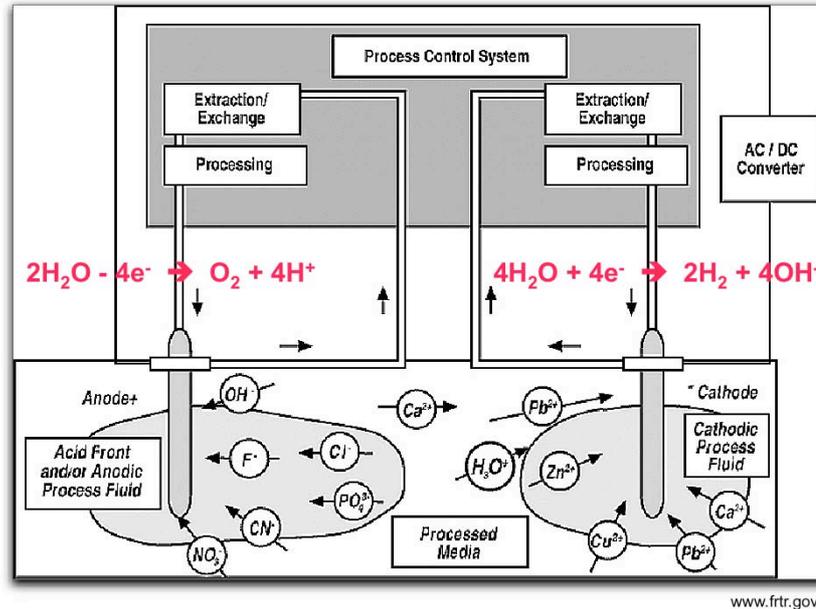
www.ftr.gov

Ánodo (+); cátodo (-).

La corriente eléctrica genera la formación de un frente ácido en el ánodo y uno básico en el cátodo a partir de la disociación de algunas moléculas de agua; esta generación de condiciones ácidas y básicas puede ayudar a la desorción, disolución y transporte de algunos contaminantes metálicos hacia sistemas de recolección ubicados en el cátodo.



Tratamiento electroquímico



Las altas concentraciones de iones que ocurren en los electrodos provocan por un lado la precipitación en los electrodos y la producción de gases como resultados de las reacciones de oxidación y reducción que tienen lugar en el ánodo y en el cátodo, respectivamente, según las siguientes reacciones.



El transporte de H^+ es aproximadamente dos veces más rápido que el de los OH^- . Por ello el frente ácido se mueve a mayor velocidad que el frente básico. Por lo que el espacio entre los electrodos tiende a acidificarse.

□



Tratamiento electroquímico

Descontaminación de suelos
Técnicas físicas y químicas III. **TRAT. ELECTROQUÍMICO**



Electrodos de muy diversos tipos, unos rígidos

□



Descontaminación de suelos
Técnicas físicas y químicas III. **TRAT. ELECTROQUÍMICO**

Tratamiento electroquímico



www.terrancorp.com

Electrodos incluidos en un material “no rígido”. Son las cintas grises tiradas sobre el suelo.

□



Tratamiento electroquímico



Descontaminación de suelos
Técnicas físicas y químicas III. **TRAT. ELECTROQUÍMICO**



□ Aplicaciones y ventajas

- Para contaminantes iónicos: cationes, aniones y compuestos orgánicos polares y apolares.
- No necesitan suelos porosos.
- Sensible a concentraciones muy bajas (pocos mg/kg).
- Técnica muy poco utilizada.

-- La remediación electroquímica se puede aplicar a suelos contaminados con contaminantes iónicos: cationes como metales pesados (Cu, Zn, Mn, Cd, Hg, Cr,...), ión amonio y compuestos orgánicos cargados positivamente; aniones inorgánicos (cloruros, cianuros, fluoruros, nitratos, sulfatos) y cualquier otra sustancia de naturaleza iónica o ionizable. Además, el transporte por electroosmosis permitirá eliminar del suelo otro tipo de sustancias no iónicas, compuestos orgánicos polares, pero también apolares como benceno, tolueno, etilbenceno, xileno, cetonas, fenantreno, fenol, hidrocarburos, PAHs, BTEX.

-- No necesitan suelos porosos como le ocurre a otras técnicas in situ, actúa sin problemas en suelos de baja permeabilidad (arcillosos).

-- Técnica muy poco utilizada. Las demostraciones realizadas hasta la fecha han dado resultados muy diferentes.



□ **Limitaciones e inconvenientes**

- Difícil para suelos con bajo contenido en humedad (<10%).
- Corrosión con electrodos metálicos.
- Se producen reacciones de oxidación/reducción.
- Los contaminantes no se destruyen.
- Técnica poco experimentada.
- Resultados función de muchos factores poco conocidos.

-- El tratamiento se dificulta para suelos con bajo contenido en humedad (<10%). La máxima efectividad se presenta a un 15-20%. Si el suelo no presenta suficiente humedad la inyección de agua puede propagar la contaminación a otras zonas.

-- Si no se utilizan electrodos inertes (de carbón, grafito o de platino), los metálicos pueden corroerse y aportan contaminación al suelo.

-- Se producen reacciones de oxidación/reducción que pueden dar origen a compuestos tóxicos.

-- Técnica poco experimentada. Los ensayos en el laboratorio en muchas ocasiones no se corresponden en la práctica, debido a la dificultad de reproducir en el laboratorio las condiciones del suelo

-- Resultados función de muchos factores todavía poco conocidos,

-- del suelo: procesos físicos, químicos y biológicos

-- del contaminante: especie, conc, solubilidad, movilidad iónica



- Tiempo**
 - Procedimiento de corto a medio.

- Costes**
 - De moderados costes, 120 \$/m³

Los costes pueden variar mucho en función de una serie de parámetros: conductividad del suelo, tipo de contaminantes y distancias entre los electrodos.

□



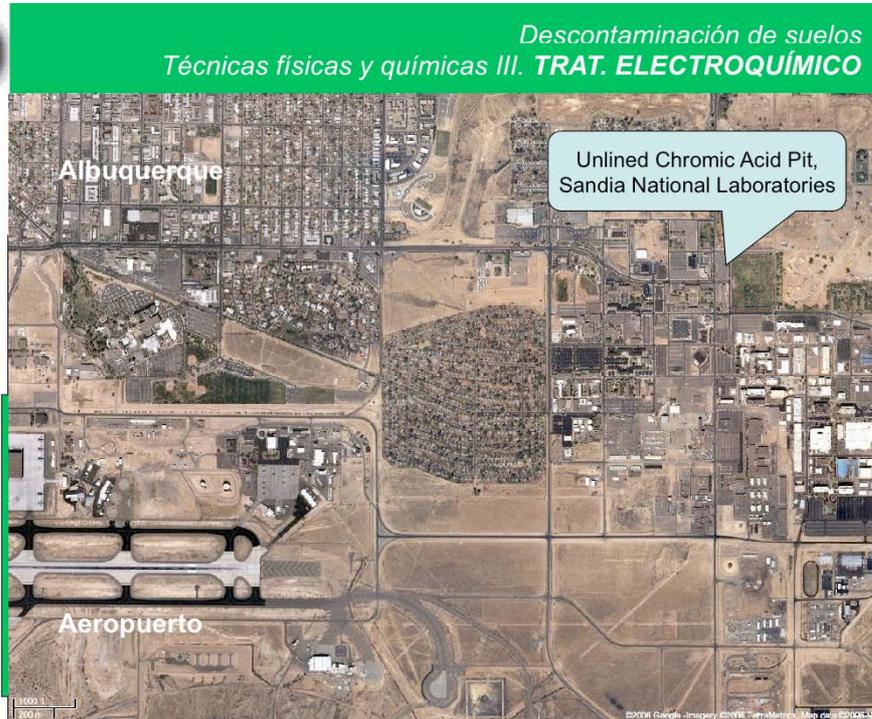
Un caso práctico: Unline Chromic

Un caso práctico de resultados satisfactorios

□



Un caso práctico: *Unline Chromic*



En las instalaciones de Sandia National Laboratories existe una zona de acumulación controlada de residuos con alto contenido en cromo que ha llegado a migrar a los suelos circundantes.



Situación inicial

Localización. Unlined Chromic Acid Pit, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New México (USA)

Origen de la contaminación.

Sandia National Laboratories residuos con alto contenido en Cr.

Contaminantes.

Cr máximas > 10.000 mg/kg y con medias de Cr 200 mg/kg a una profundidad de 5 metros y Cr lixiviado (según TCLP) 28 mg/L.

Área contaminada.

Aproximadamente 15 m².

Cr. Para áreas industriales. Nivel de referencia 200 mg/kg.
Nivel de Intervención 1.000. Valores normales en suelos 20 a 100 mg/kg.

NUMERO DE VECES QUE SE SUPERA EL NIVEL DE REFERENCIA. 1994 CR. HASTA CASI 50 VECES (49).



Un caso práctico: *Online Chromic*

Tratamiento

Técnica. Tratamiento electroquímico in situ.

Procedimiento.

Electrodos de iridio/titanio con un revestimiento de cerámica porosa.

El propio personal de Sandia National Laboratories instaló un equipo de remediación electroquímica a nivel de ensayo in situ.

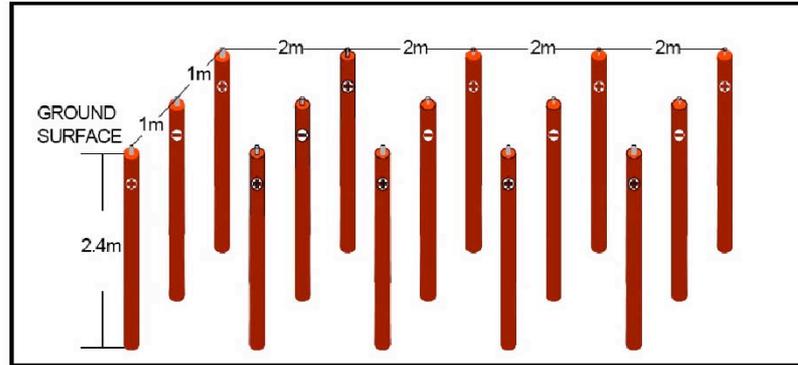


Descontaminación de suelos
Técnicas físicas y químicas III. **TRAT. ELECTROQUÍMICO**

Un caso práctico: Uline Chromic

Tres filas.

Dos hileras de cinco cátodos frente a una de otros cinco ánodos (16 m²).



Voltaje de 1.572 kW/hr; a cada electrodo fue de 15 amps.

Adicionalmente se contaba con un sistema de manejo de agua y vacío.

EPA 542-C-04-004



Descontaminación de suelos
Técnicas físicas y químicas III. TRAT. ELECTROQUÍMICO

Un caso práctico: Uline Chromic

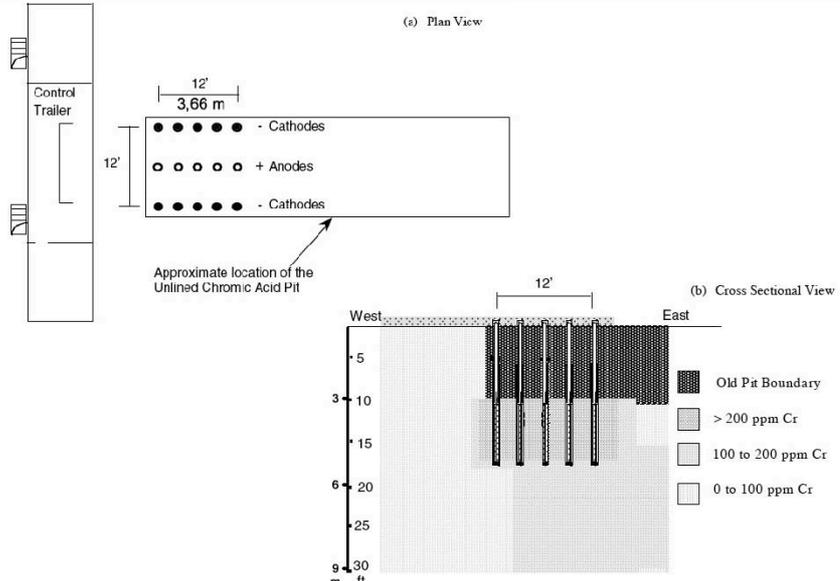


Figure 1. Layout of the Sandia National Laboratories Field Demonstration at the Uline Chromic Acid Pit (modified from Lindgren, 1999b)



Tratamiento

Design and Operating Parameters for the SNL Field Demonstration

Parameter	Value
Total treatment area	144 ft ²
Treatment depth	Soil zone 8 to 14 ft below ground surface
Distance between central row of anodes and either row of cathodes	6 ft
Total treatment period	2,700 hours
Total energy applied	1,572 kW/hrs
pH of solution at anode	8.8 (maintained using sodium hydroxide solution)
pH of solution at cathode	5.5 (maintained using acetic acid)
Electricity applied to each electrode	•15 amperes

Source: Lindgren et. al., 1998 and U.S. EPA, 1997

Parámetros de trabajo del experimento.

El sistema trabajó ininterrumpidamente.

Los electrodos de iridio recubiertos de titanio tenían una recubierta externa de cerámica porosa y entre el electrodo y la cerámica había un fluido constantemente circulando. En el caso del ánodo el pH de la disolución fue de 8,8, mantenido con hidróxido sódico, mientras que en el cátodo la disolución tenía un pH de 5,5, controlado con ácido acético.

Se aplicó un vacío en el interior del ánodo para crear un gradiente de presión necesario para controlar el movimiento de agua entre la recubierta porosa del ánodo y el suelo.

El gas hidrógeno producido durante las reacciones electrolíticas del cátodo fue purgado periódicamente para evitar el riesgo de explosiones.



Un caso práctico: Uline Chromic

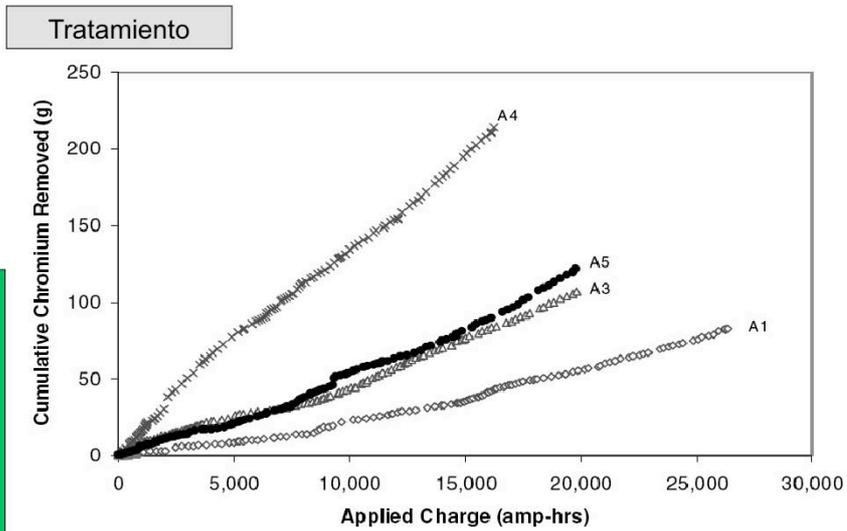


Figure 2. Cumulative Chromium Removal as a Function of Applied Charge per Anode (modified from Lindgren, 1999b)

La gráfica representa la extracción de Cr^{6+} por amperio y hora.



Un caso práctico: *Unline Chromic*

Tratamiento

Características del suelo tratado.

Textura franca con gravas.
Humedad 10%. Conductividad <10 mS/m.

Duración del tratamiento. 5 meses.

Costes. No proporcionados.



Resultado final

Resultados.

Se realizaron 12 ensayos.

En 2.700 horas se extrajeron 600g Cr⁶⁺; a 0,22 g/hr.

Después tratamiento suelo junto a los cátodos:

- 72 mg/kg Cr total (64% de eficacia)
- < 5 mg/L de Cr lixiviado TCLP (82% de eliminación).

Cr: valor antes del tratamiento 200 mg/kg (valores normales en suelos, 20 a 130 mg/kg; niveles de intervención para áreas industriales 1.000 mg/kg)

Cr lixiviado TCLP antes del tratamiento de 28 mg/L.

2700 horas a ocho horas al día sería aproximadamente un año (337 días).

El tratamiento no requirió la utilización de importantes cantidades de agua.

El sistema empleado ha demostrado eficacia pero necesita ser replanteado para que pueda ser distribuido a nivel comercial.



Tratamientos electroquímicos

Otros casos con resultados satisfactorios

Table 1. *Electrokinetic Projects Completed by Geokinetics**

Project	Soil Type	Volume (yd ³)	Initial Concentration (mg/kg)	Final Concentration (mg/kg)	Efi-cacia (%)
Paint Factory	Peat/Clay	300	Cu >1,220	Cu <200	83
			Pb >3,780	Pb <280	93
Galvanizing Plant	Clay	50	Zn 1,400	Zn 600	57
Timber Plant	Clay	250	As >260	As <30	>88
Temporary Landfill	Sand	4,000	Cd >180	Cd <40	>78
Military Galvanizing Plant	Clay	2,500	Cr 7,300	Cr 755	90
			Ni 860	Ni 80	91
			Cu 770	Cu 98	87
			Zn 2,600	Zn 289	89
			Pb 730	Pb 108	85
			Cd 660	Cd 47	93

*Geokinetics International, Inc., Berkeley, California

EPA 542-C-04-004

Eficacia de la limpieza > 90%.

Para pasar las yardas cúbicas a metros cúbicos hay que dividir el valor de aquellas por 0,765.

Timber = tableros de madera para la construcción



Un caso práctico: N. A. Weapons

Un caso práctico de resultados deficientes

Situación inicial

Localización. California, Venture County, Point Mugu.



□



Un caso práctico: N. A. Weapons



Una zona de la Base Aeronaval fue usada para manufacturas metálicas y los residuos originados fueron descargados en unas lagunas de almacenaje. Igualmente fueron a parar a estas lagunas los residuos originados por el laboratorio fotográfico de la Base. Como consecuencia los suelos y las aguas subterráneas quedaron contaminados.



Situación inicial

Origen de la contaminación.

Manufacturas metálicas y residuos de laboratorio fotográfico.

En octubre de 1998 el U.S. Army Environmental Center desarrolló una demostración de descontaminación mediante el procedimiento electroquímico.

Contaminantes.

Metales pesados en suelos (horizonte superficial)

Cr 25.100 mg/kg

Cd 1.810 mg/kg , lixiviado TCLP 10,5 mg/L.

Cr. Para áreas industriales. Nivel de referencia 200 mg/kg.
Nivel de Intervención 1.000. Valores normales en suelos 20 a 100 mg/kg.

NUMERO DE VECES QUE SE SUPERA EL NIVEL DE REFERENCIA. 124 VECES.

Cd. Para áreas industriales. Nivel de referencia 6 mg/kg.
Nivel de Intervención 30. Valores normales en suelos <1 (0,2 a 0,7 mg/kg).

NUMERO DE VECES QUE SE SUPERA EL NIVEL DE REFERENCIA. 300 VECES .



Un caso práctico: N. A. Weapons

Tratamiento

Técnica. Tratamiento electroquímico in situ.

Procedimiento

- 24 electrodos,
- energía,
- canalizaciones para reactivos,
- sistema para gases



Procedimiento.

Tras unos ensayos en el laboratorio se planificó un proyecto de ejecución con 24 electrodos (24 ánodos y 14 cátodos) de titanio recubiertos de óxido de iridio

El sistema empleado consta además de: un conjunto de electrodos, equipo para perforar pozos, suministro de energía, canalizaciones para distribuir reactivos químicos para extraer los contaminantes de las paredes de los electrodos, y un sistema de recogida de gases que se generan en las paredes de los pozos de los electrodos.



Descontaminación de suelos
Técnicas físicas y químicas III. TRAT. ELECTROQUÍMICO

Un caso práctico: N. A. Weapons

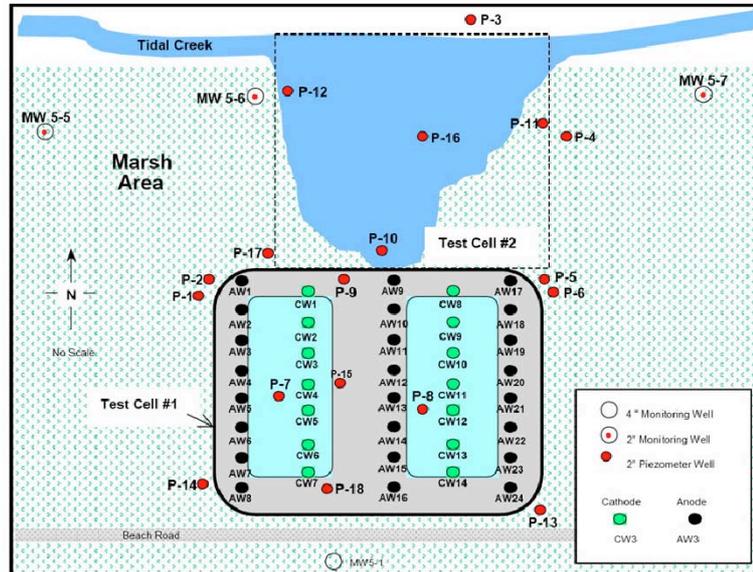


Figure 2: Schematic Showing Electrode Well Placement

EPA 542-C-04-004

Tras un ensayo la distancia entre los ánodos y los cátodos fue de 4,3m.



Un caso práctico: N. A. Weapons

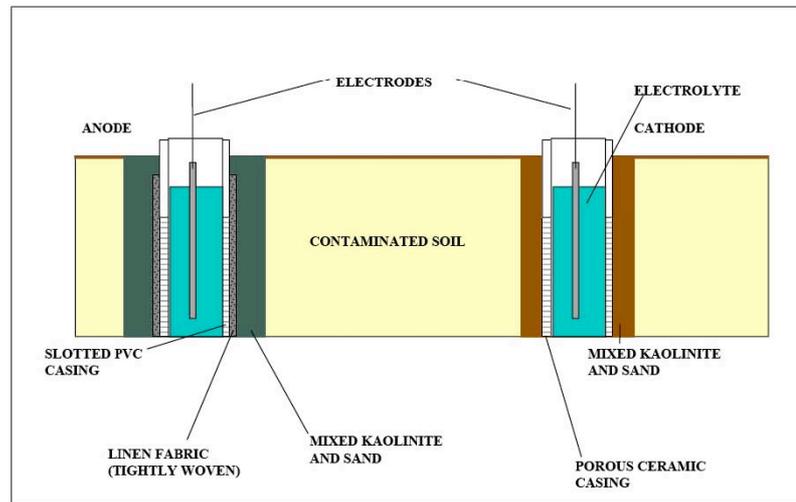


Figure 3: Electrode Well Construction

EPA 542-C-04-004

Los electrodos (de titanio revestido de óxido de iridio) tenían una recubierta de PVC ocupando un total de unos 10 cm de diámetro y forradas de un fino tejido de lino; finalmente se construyó una capa bien empaquetada de una mezcla de arena y caolinita.

Las características eléctricas del sistema fueron: 10 kW, 30 v y 333 amperios.



Un caso práctico: N. A. Weapons

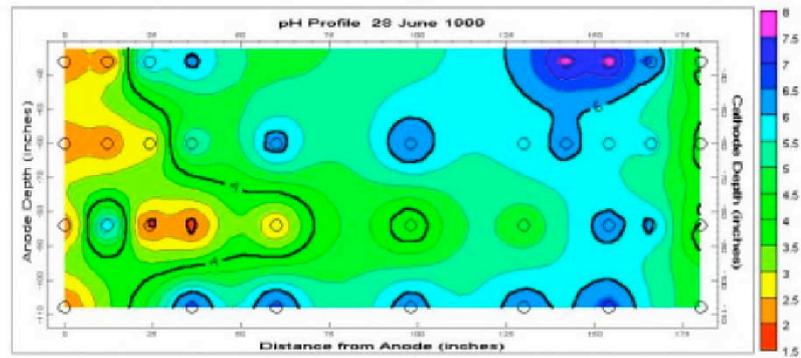


Figure 8: pH Profile (June 1999)

EPA 542-C-04-004

Se produce un frente de acidez que se desplaza del ánodo al cátodo y es el responsable de la solubilidad y arrastre de los metales pesados.



Un caso práctico: N. A. Weapons

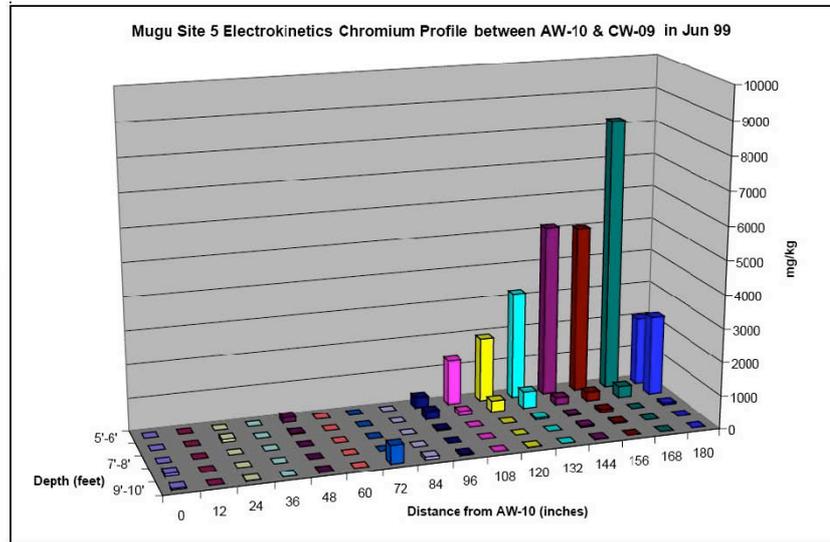


Figure 10: Chromium Profile (June 1999)

EPA 542-C-04-004

Los resultados de Junio de 1999 (a los 16 meses de tratamiento) muestran un movimiento del Cr hacia la región del cátodo, con concentraciones que van aumentando al aproximarse al cátodo, alcanzando valores de 8.000 mg/kg.



Un caso práctico: N. A. Weapons

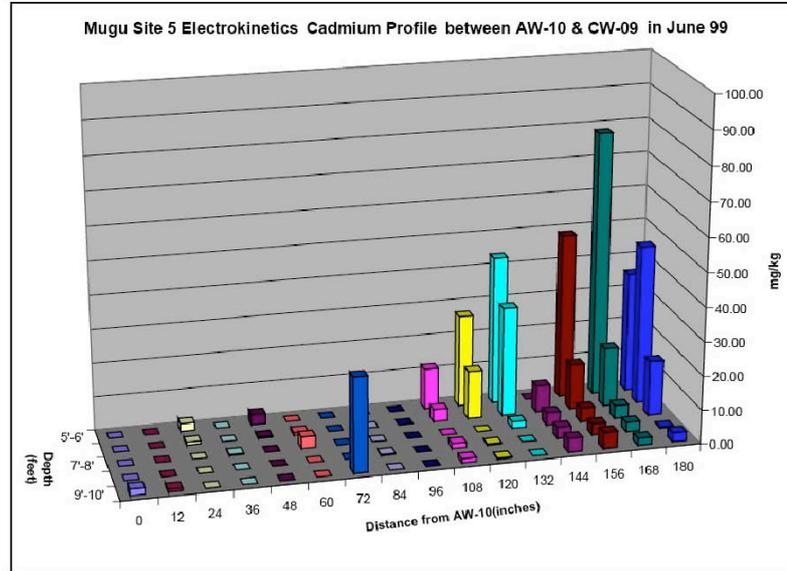


Figure 9: Cadmium Profile (June 1999)

EPA 542-C-04-004

La movilidad del Cd fue también marcada.

Resumiendo, hay una movilización del Cr y del Cd hacia el cátodo pero su desplazamiento es muy lento.



Tratamiento

Características del suelo tratado.

Granulometría: 85% arenas, 6% limos y 1% arcillas.

pH de 5,84;

materia orgánica 6.390 mg/kg;

conductividad eléctrica 0,045 cm/sec;

capacidad de intercambio catiónico 3,9 cmol_c/kg.

Total de suelo tratado. 2.023 m².

Duración del tratamiento. 22 semanas.

Costes.

Importe total 1.193.050\$. El coste unitario fue de 590\$/m².



Resultado final

Objetivos.

Rebajar las concentraciones de Cr y Cd hasta los límites fijados por el Estado de California: 2.500 mg/kg de Cr y 100 mg/kg de Cd.

Concentraciones finales.

Después de 22 semanas se suspendió el tratamiento.

La inadecuada extracción se atribuyó a varias causas:

- excesiva distancia entre los electrodos
- demasiado bajo el potencial del campo eléctrico
- reacciones químicas entre los H^+ y OH^- producidos y los compuestos del suelo, con producción de compuestos VOCs tóxicos como el sulfuro de hidrógeno y trialometano en las paredes de los pozos de los ánodos.

Después de 22 semanas de tratamiento se suspendieron las operaciones al no aproximarse a los objetivos fijados por la baja operatividad de la técnica.



Desorción térmica *in situ*

Desorción térmica

(Thermal Desorption)

In situ y ex situ.

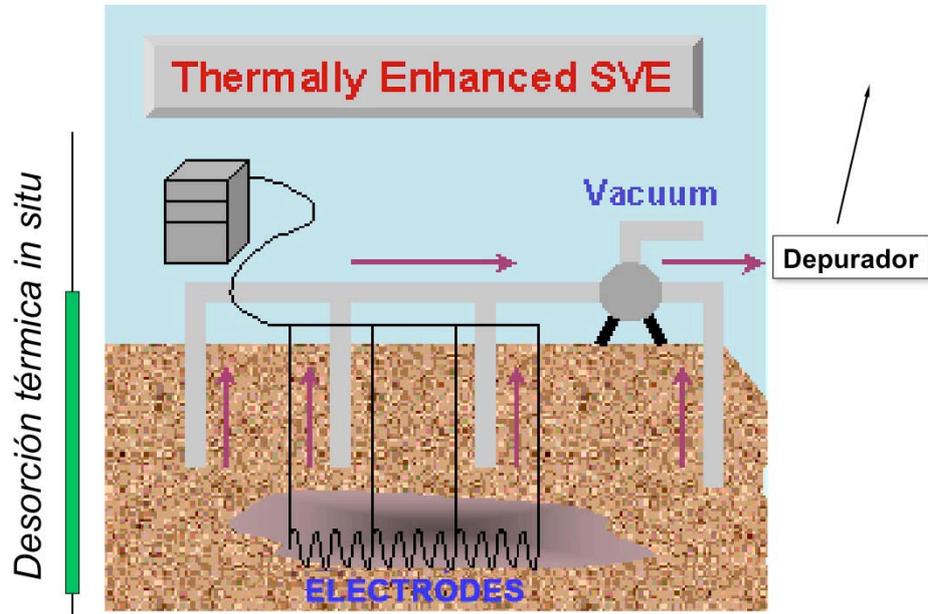
Localización

Técnica **in situ**.

Descripción

Volatilización de los contaminantes por la aplicación de calor.

Para contaminantes semivolátiles

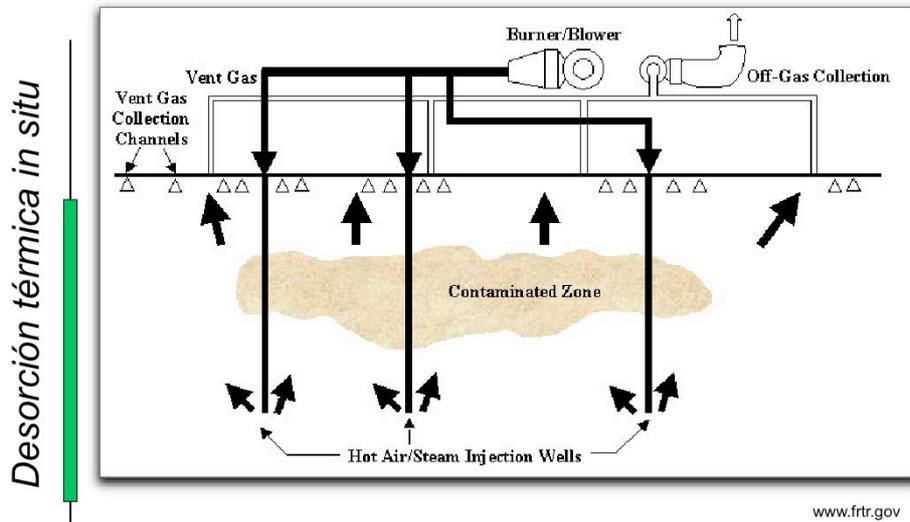


Normalmente complementada con la técnica SVE para extraer los gases y finalmente con un sistema de depuración antes de soltarlos a la atmósfera.

Calentamiento, volatilización de contaminantes y extracción de vapores mediante vacío



Typical Hot Air Injection System Thermally enhanced SVE



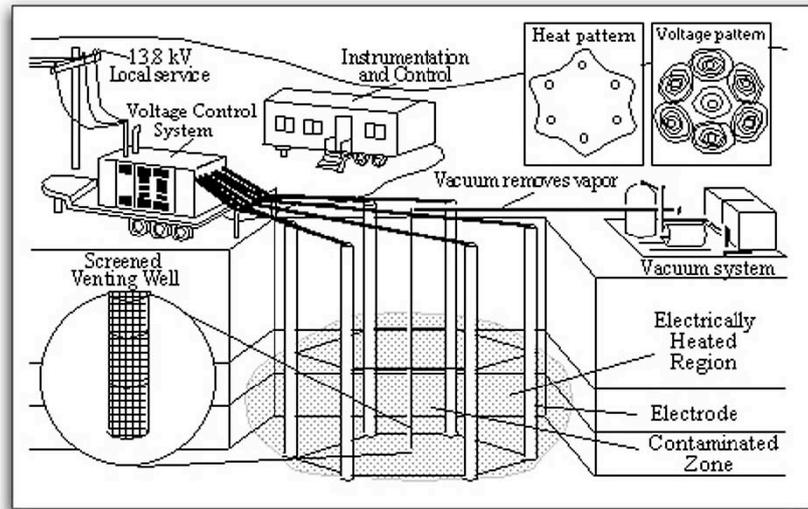
El calentamiento se puede realizar por varios procedimientos: inyección de aire caliente, resistencias eléctricas o por radio frecuencia.

POR INYECCIÓN DE AIRE CALIENTE. Muy similar al sistema SVE, ya descrito, con la sola diferencia de inyectar aire caliente (se le llama también Enhanced Soil Vapor Extraction; Extracción Mejorada de Vapores por Vacío). El aire caliente se inyecta por debajo del suelo contaminado.



Typical Six-Phase Soil Heating System

Desorción térmica in situ



CALENTAMIENTO MEDIANTE RESISTENCIAS ELÉCTRICAS. Se utiliza para suelos muy poco permeables como los arcillosos.



Aplicaciones y ventajas

- VOCs y SVOCs (algunos pesticidas y carburantes).
- No necesitan suelos porosos.
- Puede suelos con altos contenidos en humedad.
- Poco empleada (pero si la ex situ).

Limitaciones e inconvenientes

- Mal para altos contenidos en materia orgánica.
- Ciertos contaminantes requieren muy altas T^a.
- Los contaminantes no se destruyen.
- Los gases emitidos han de ser recogidos y tratados.

Tiempo Procedimiento de corto a medio plazo.

Costes De bajo coste, de 30 a 130 \$/m³



Desorción térmica (Thermal Desorption)

In situ y ex situ.

Localización

Técnica **ex situ**.

Descripción

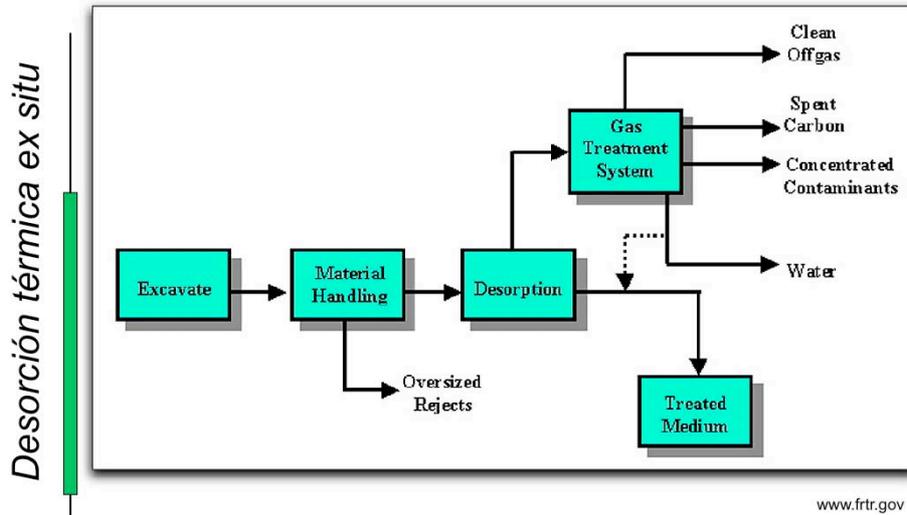
Volatilización de contaminantes mediante calor en cámara.



Descontaminación de suelos
Técnicas físicas y químicas III. **DESORCIÓN TÉRMICA**

High Temperature Thermal Desorption Process

Low Temperature Thermal Desorption Process



Existen dos procesos: de alta (HTTD) y de baja (LTDD) temperatura.

Para la cámara de desorción de alta temperatura se trabaja de 320 a 560°C y frecuentemente se combina con la solidificación / estabilización, deshalogenación o la incineración dependiendo del tipo de contaminantes.

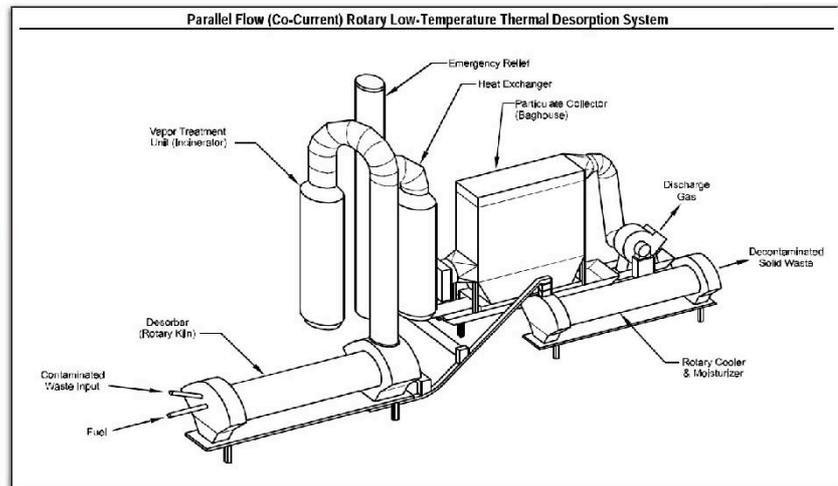
La de baja temperatura trabaja de 90 a 320°C, se utiliza para remediación de compuestos del petróleo en el suelo (con eficacia > 95%) y los daños son mínimos (físicos, químicos e incluso biológicos).

Además de los gases con esta tecnología se pueden arrastrar partículas de contaminantes. Para separarlas luego hay que utilizar cualquier sistema de filtros de depuración de gases tan utilizados en la técnica SVE (carbón activos, multifiltros, etc).



Descontaminación de suelos Técnicas físicas y químicas III. **DESORCIÓN TÉRMICA**

Desorción térmica ex situ



<http://www.epa.gov/>

El sistema de desorción térmica más común consta de un cilindro que gira según un eje horizontal calentado directa o indirectamente. Los gases son separados de las partículas y tratados separadamente.



□ Aplicaciones y ventajas

- Remueve contaminantes volátiles, VOCs y SVOCs, carburantes, pesticidas y algunos metales pesados.
- Muy adecuada para destrucción total de CHs y PAHs.
- Rendimientos idóneos con bajas concentraciones.
- Se dispone de numerosos y eficaces equipos muy experimentados para el tratamiento on y off site.

El proceso de alta temperatura es más efectivo para remover los SVOCs y metales volátiles.



Descontaminación de suelos
Técnicas físicas y químicas III. **DESORCIÓN TÉRMICA**

Desorción térmica ex situ





□ Aplicaciones y ventajas

- Remueve contaminantes volátiles, VOCs y SVOCs, carburantes y algunos metales pesados y pesticidas.
- Muy adecuada para destrucción total de CHs y PAHs.
- Rendimientos idóneos con bajas concentraciones.
- Se dispone de equipos muy experimentados.
- Tratamiento muy rápido (25 tn / hora).
- Costes competitivos.
- Fácilmente combinable con otras tecnologías.
- El suelo tratado puede ser devuelto a su posición inicial con buenas prestaciones.
- Se pueden rebajar concentraciones de TPH por debajo de 10 ppm y las de BTEX a 100 ppb (e incluso menores).
- Se trata de una técnica muy utilizada (ex situ).



Limitaciones e inconvenientes

- Dificultad para suelos con altos contenidos en humedad, materia orgánica, arcillas, los SVOCs y VOCs.
- Los VOCs clorurados pueden producir compuestos muy tóxicos, aunque de vida corta.
- Los contaminantes no se destruyen.

Tiempo Procedimiento de corto plazo.

Costes Debajo a moderado, de 45 a 330 \$/tn.

El tratamiento se dificulta para suelos con altos contenidos en humedad (desechado previo).

Si el suelo presenta altos contenidos en materia orgánica y/o de arcillas, los SVOCs y VOCs se encuentran fuertemente retenidos y puede fallar esta técnica.



Un caso práctico

Situación inicial

Localización. New Jersey (USA)

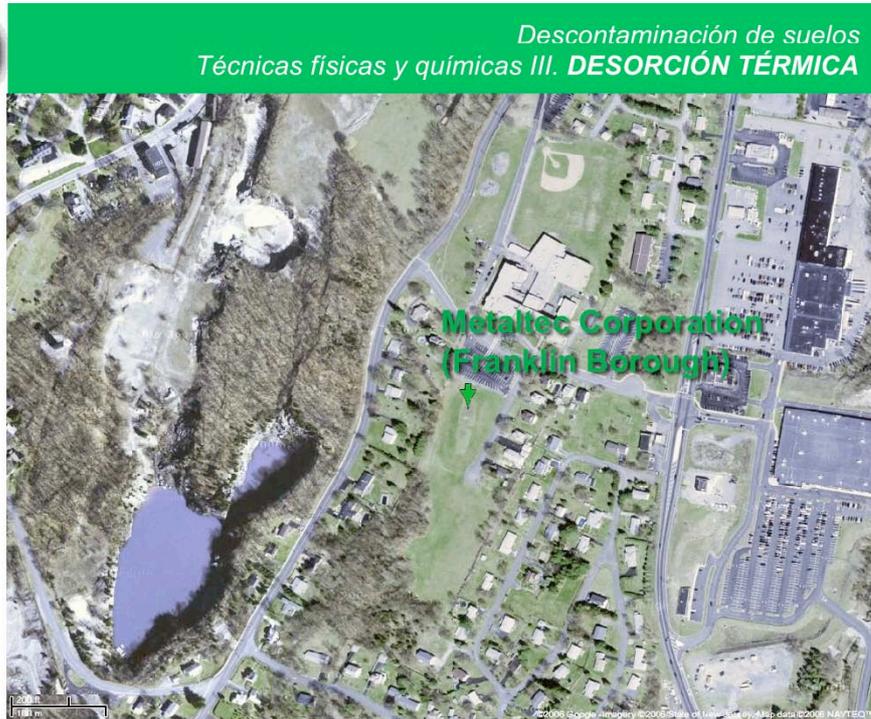
Ex situ. Franklin Borough



□



Ex situ. Franklin Borough



Origen de la contaminación. Desde 1965 a mediados de los 1980, la Metaltec Corporation, abandona en la zona los desechos de sus manufacturas quedando fuertemente contaminados los suelos de la zona.



Situación inicial

Ex situ. Franklin Borough

Origen de la contaminación.

1965 -1980, la Metaltec Corporation, desechos de sus manufacturas.

1980 el Departamento de Protección Ambiental de New Jersey realiza una inspección, encuentra los suelos contaminados por VOCs y metales pesados, y también en las aguas subterráneas y en las aguas de bebida.

1983 se incluye en el listado nacional de sitios contaminados.

1994 EPA procede a su remediación. Se delimitan cuatro parcelas, en una se procede a la descontaminación del suelo mientras que las otras tres, por su toxicidad e intensa contaminación, se excavan los suelos y se llevan a un vertedero.

(envases metálicos para pinturas en sprays, tubos para barras de labios, puntas de bolígrafo, etc)



Ex situ. Franklin Borough

Contaminantes.

Compuestos orgánicos volátiles clorurados (VOCs) y metales pesados, fundamentalmente Ni y Cr.

	suelos del sitio mg/kg
TCE	7.600
DCE	6.200

NIVELES REFERENCIA BOE 18/01/2005

tricloroetileno (TCE), industrial 70 mg/kg; residencial 7; otro uso 0, 7

Dicloroetileno (DCE) industrial 1 mg/kg; residencial 0, 1; otro uso 0, 01



Ex situ. Franklin Borough

Contaminantes.

Compuestos orgánicos volátiles clorurados (VOCs) y metales pesados, fundamentalmente Ni y Cr.

	suelos del sitio mg/kg	Nivel Genérico de Referencia Uso industrial mg/kg	Nivel Genérico de Referencia Uso residencial mg/kg
TCE	7.600	70	7
DCE	6.200	1	0,1

NIVELES REFERENCIA BOE 18/01/2005

tricloroetileno (TCE), industrial 70 mg/kg; residencial 7; otro uso 0, 7

Dicloroetileno (DCE) industrial 1 mg/kg; residencial 0, 1; otro uso 0, 01



Ex situ. Franklin Borough

Contaminantes.

Compuestos orgánicos volátiles clorurados (VOCs) y metales pesados, fundamentalmente Ni y Cr.

	suelos del sitio mg/kg	Nivel Genérico de Referencia Uso industrial mg/kg	Nivel Genérico de Referencia Uso residencial mg/kg	Número de veces que se supera el NGR residencial
TCE	7.600	70	7	1.085
DCE	6.200	1	0,1	62.000

NIVELES REFERENCIA BOE 18/01/2005

tricloroetileno (TCE), industrial 70 mg/kg; residencial 7; otro uso 0, 7

Dicloroetileno (DCE) industrial 1 mg/kg; residencial 0, 1; otro uso 0, 01



Descontaminación de suelos
Técnicas físicas y químicas III. **DESORCIÓN TÉRMICA**

Tratamiento

Ex situ. Franklin Borough

Técnica.

Tratamiento por desorción térmica de baja temperatura ex situ.

Procedimiento.

300°C, durante 15-20 minutos en cámara de desorción rotatoria.

Características del suelo tratado.

Arcillo arenoso con gravas. Humedad < 20%

Total de suelo tratado. 5.480 m³

Duración del tratamiento. 2 meses.

Costes. 998.238 \$. Unidad de coste 182 \$/m³ de suelo.

Capacidad del sistema 16 t/hora



Resultado final

Ex situ. Franklin Borough

Objetivos.

Los objetivos de la limpieza fueron (según las leyes locales):

- 1,2- DCE < 33 mg/kg (6.600 mg/kg en el suelo contaminado)
- TCE < 5,6 mg/kg (7.600 mg/kg en el suelo contaminado)

Concentraciones finales.

Los objetivos se cumplieron en todos los casos.

No hubo que volver a tratar ninguna muestra.

No se complementó la limpieza con ninguna otra técnica.

El aire emitido durante el proceso cumplió en un 99,99% con EPA.

tricloroetileno (TCE), industrial 70 mg/kg; residencial 7; otro uso 0, 7

Dicloroetileno (DCE) industrial 1 mg/kg; residencial 0, 1; otro uso 0, 01



Descontaminación de suelos Técnicas físicas y químicas III. **DESORCIÓN TÉRMICA**

Rendimientos de esta técnica en diversos proyectos realizados

Desorción térmica ex situ

Desorción térmica ex situ

Contaminantes	Niveles iniciales, mg/kg	Niveles finales, mg/kg	Efectividad de la limpieza, %	Duración del tratamiento, meses	Suelo tratado, m ³	Coste unitario, \$/m ³	Localidad (USA)
Tricloroetano	3.310	0,1	99,997	10	15.100	182	McKin Co., Gray, Maine
PAH	130	1	99,2				
Etilbenceno	35	1	97,1				
Tolueno	35	1	97,1				
Bifenilo policlorado	2.400 - 23.000	< 2	> 99,92 - 99,99	6	11.571	214	Outboard Marine Co., Waukegan, Illinois
SVOC	130	ND		5	11.612		Pristine Inc, Reading, Ohio
DDT	0,11-8,2	ND					
Pb	26-1.100	ND					
** Bifenilo policlorado	5000*	2	99,96	12	38.130	304	Wide Beach Dev., Brant, New York
PAH individuales	2 (419*)	0,44	99,998	1	2.000 tn	89 \$/tn	Solvent Refined Coal Pilot Plant, Ft Lewis, Washington
Diclorobenceno	18	< 1	> 94,4	3	10.700 tn	217 \$/tn	Naval Air Station Cecil Field, Jacksonville, Florida
Maftaleno	19	< 1	> 94,7				
Metilnaftaleno	47	< 1	> 97,9				
HCP	300.000*	< 200	> 99,9	3	12.500	266	Port Moller Radio Relay St, Port Moller, Alaska
Derivados del diesel	11.000*	< 200	> 98,2				
Tricloroetano	7.600	ND (< 0,002)	100	2	5.546	180	Metatec, Franklin Borough, New Jersey
Dicloroetano	8.600	ND (< 0,002)	100	2			
Tetracloroetano	760	6	99,2	2		963	Rocky Flats Env., Golden, Colorado
PAH	3.794*	< 20	> 99,5	3	3.356 tn	270 \$/tn	Reilly Industries, Indianapolis, Indiana
Prindina	5.673*	< 0,7	> 99,99				
Benceno	191*	< 0,1	> 99,9				
Mercurio	5.510*	0,6 - 8	99,99 - 99,8		1,4 tn		Brookhaven National Lab., Upton, New York
Bifenilo policlorado	1.269- 4.000	< 1	> 99,92 - 99,97	16	70.640	222	Industrial Latex, Wallington, New Jersey
Bis-etilhexilftalato	280	< 46	> 83,6				

* Valores máximos; ** Desorción térmica + deshalogenación.

ND = no detectados (por debajo de los límites de detección)

HCP, Hidrocarburos de petróleo; PAH, hidrocarburos aromáticos policíclicos; SVOC, compuestos orgánicos semivolátiles.



Descontaminación de suelos Técnicas físicas y químicas III. **DESORCIÓN TÉRMICA**

Rendimientos de esta técnica en diversos proyectos realizados

Desorción térmica ex situ

Contaminantes	Niveles iniciales, mg/kg	Niveles finales, mg/kg	Efectividad de la limpieza, %	Duración del tratamiento, meses	Suelo tratado, m ³	Coste unitario, \$/m ³	Localidad (USA)	Procedencia de la contaminación
TCE	760	6	99,2	2	953		Rocky Flats Env., Golden, Colorado	Fábrica de armamento militar
TCE PAH Etilbenceno Tolueno	3.310 130 35 35	0,1 1 1 1	99,997 99,2 97,1 97,1	10	15.100	192	McKin Co., Gray, Maine	Planta de tratamiento de residuos (petróleo y reactivos químicos industriales)
PAH	2 (419*)	0,44	99,998	1	1.200	160	Solvent Refined Coal Pilot Plant, Ft Lewis, Washington	Refinería de petróleo
PCB	2.400 - 23.000	< 2	> 99,92 - 99,99	6	11.571	214	Outboard Marine Co., Waukegan, Illinois	Fábrica de componentes marinos
PCB**	5000*	2	99,96	12	38.130	304	Wide Beach Dev., Brant, New York	Uso de PCBs como estabilizador de caminos
PCB Bis- etilhexifthalato	1.260- 4.000; 280	< 1	> 99,92 - 99,97; > 83,6	15	70.640	222	Industrial Latex, Wallington, New Jersey	Fábrica de caucho y adhesivos
SVOC DDT Pb	130 0,11-8,2 26-1.100	ND ND ND		5	11.612		Pristine Inc, Reading, Ohio	Manipulación de ácidos, disolventes y pesticidas
HCP Derivados del diesel	300.000* 11.000*	< 200 < 200	> 99,9 > 98,2	3	12.500	266	Port Moller Radio Relay St, Port Moller, Alaska	Almacenamiento y suministro de carburantes
Diclorobenceno Naftaleno Metilnaftaleno	18 19 47	< 1 < 1 < 1	> 94,4 > 94,7 > 97,9	3	6.300	391	Naval Air Station Cecil Field, Jacksonville, Florida	Mantenimiento aviones y armamento diverso
Mercurio	5.510*	0,6 - 8	99,99 - 99,8				Brookhaven National Lab., Upton, New York	Actividades militares

* Valores máximos; ** Desorción térmica + deshalogenación.
 ND = no detectados (por debajo de los límites de detección)
 TCE, tricloroetileno; DCE, dicloroetileno; PCB, bifenilos policlorados;
 HCP, Hidrocarburos de petróleo; PAH, hidrocarburos aromáticos policíclicos; SVOC, compuestos orgánicos semivolátiles;

Desorción térmica ex situ



Cuadro comparativo de las acciones de estas técnicas

Comparativa

Técnica	Acción sobre los contaminantes
Soil Flushing	extrae
Soil Washing	extrae
Soil Vapor Extraction	extrae
Chemical Extraction	extrae
Oxidation/Reduction	destruye
Dehalogenation	destruye
Electrokinetic	extrae
Thermal Desorption	extrae



Las técnicas más utilizadas

- In situ
 - **** Arrastre de vapores por vacío (SVE)
 - * Tratamiento térmico
 - * Lavado

- Ex situ
 - ***** Tratamiento térmico
 - *** Extracción química



Técnica	Contaminantes
SVE	VOCs
Lavado	VOCs, SVOCs y metales pesados (solubles en agua)
Extracción química	SVOCs y metales pesados
Tratamiento térmico	VOCs y SVOCs



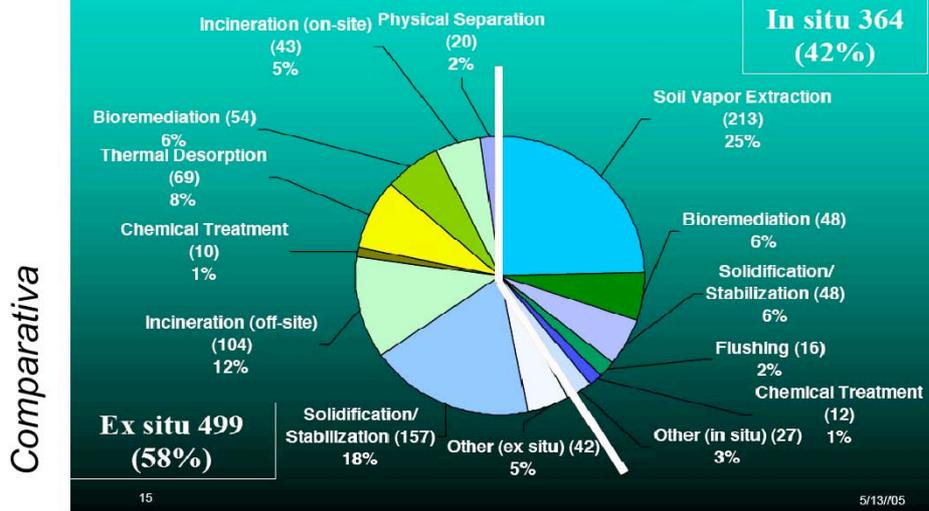
Cuadro comparativo de las acciones de estas técnicas

Comparativa

Técnica	Acción sobre los contaminantes
Soil Flushing	extrae
Soil Washing	extrae
Soil Vapor Extraction	extrae
Chemical Extraction	extrae
Oxidation/Reduction	destruye
Dehalogenation	destruye
Electrokinetic	extrae
Thermal Desorption	extrae



Superfund Source Control Treatment 863 Projects (FY 82-02)



EPA en su listado de junio de 2004 relaciona 55 proyectos IN SITU de descontaminación física y química de suelos llevados a cabo en USA. De ellos 40 emplearon el Arrastre de vapores mediante vacío; 9 tratamientos térmicos; 5 electroquímicos; 1 extracción química ; 1 oxidación reducción Tratamientos EX SITU. 24 en total. 19 Desorción térmica; 3 extracción química; 2 Lavado.

Total de proyectos EPA de descontaminación por procesos físicos y químicos (in/ex situ): 79

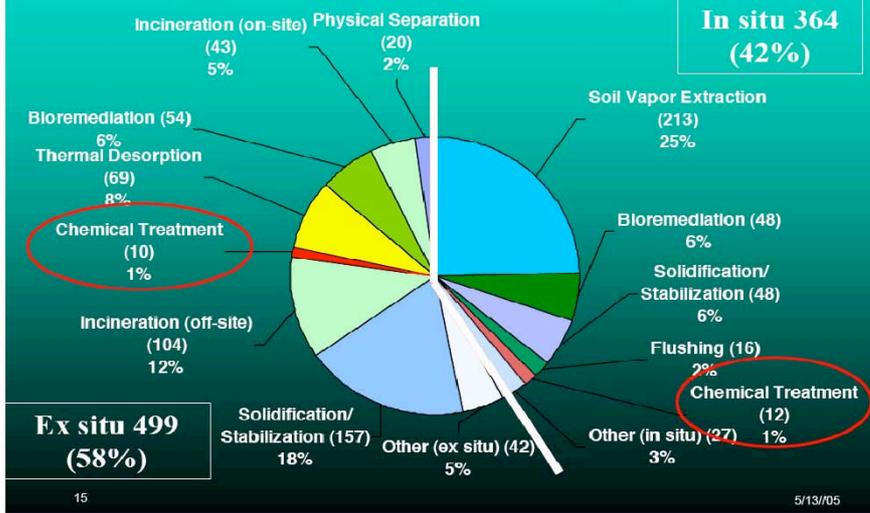
Total de proyectos EPA de descontaminación por procesos biológicos: 31

Total de proyectos EPA de aislamiento: 27



Superfund Source Control Treatment 863 Projects (FY 82-02)

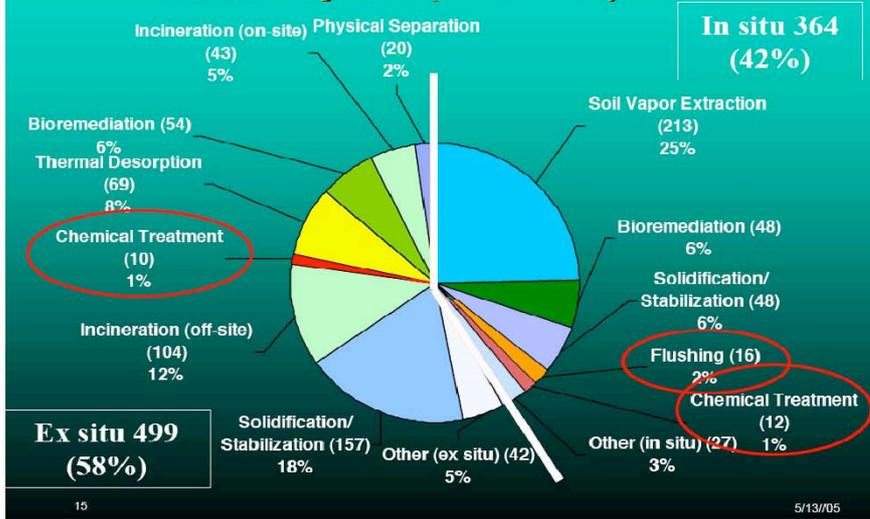
Comparativa





Superfund Source Control Treatment 863 Projects (FY 82-02)

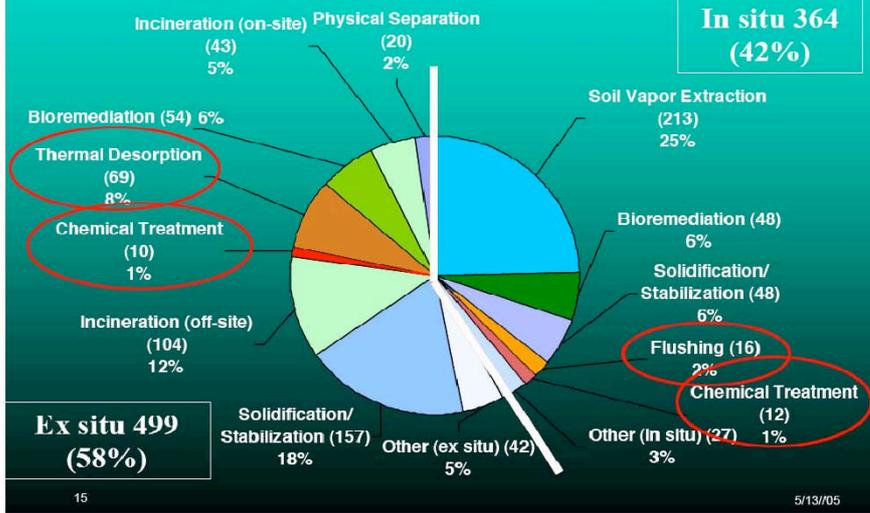
Comparativa





Superfund Source Control Treatment 863 Projects (FY 82-02)

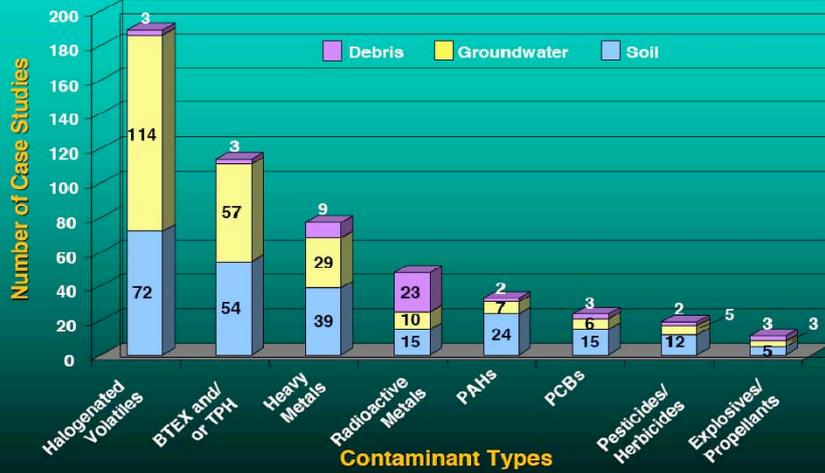
Comparativa





FRTR Cost and Performance Case Studies* Contaminants and Media Treated

Comparativa



* Some case studies address more than one type of media and/or contaminant



Comparativa de prestaciones

Cuadro comparativo de las prestaciones de estas técnicas

	Development Status	Treatment Train (excludes subject treatment)	Perilous/Potential	Availability	System Reliability/Maintainability	Cleanup Time	Overall Cost	Nonhalogenated VOCs	Halogenated VOCs	Nonhalogenated SVOCs	Halogenated SVOCs	Fuels	Inorganics	Radionuclides	Explosives
In Situ Physical/Chemical Treatment															
Soil Flushing	F	N	L	■	○	○	■	■	○	○	○	■	■	■	■
Soil Vapor Extraction	F	Y	L,V	■	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Chemical Oxidation	F	N	N	■	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Electrokinetic Separation	F	Y	L	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Thermal Treatment	F	V	L,V	■	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Ex Situ Physical/Chemical Treatment															
Soil Washing	F	Y	S, L	■	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Chemical Extraction	F	Y	L	■	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Chemical Reduction/Oxidation	F	Y	S	■	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Dehalogenation	F	Y	V	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Thermal Desorption	F	N	L, S	■	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

- VOC no halogenados: BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno), acetona, butanol, etanol, metanol, metil etil cetona, estireno, ciclohexano ...
- VOC halogenados: bromoformo, cloroformo, neopreno, tetracloroetano, tetracloroetileno, dicloroetano, dicloroetileno, diclorometano, tetracloruro de carbono, tricloroetileno (TCE), tetracloroetileno (PCE) ...
- SVOC no halogenados: fluoreno, benzoantraceno, indeno, malation, ácido benzoico, naftaleno, pireno, antraceno ...
- SVOC halogenados: doclorobenceno, triclorobenceno, clorobenceno, bifenilos policlorados (PCBs) y dentro de los pesticidas: clordano, DDT, dieldrin, etion, edrin, aldrin, endosulfan, paration ...
- Fuels: propano, antraceno, naftaleno, hexano, BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno) ...
- Inorgánicos: metales pesados, fundamentalmente
-