



Descontaminación del suelo

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 del suelo

Técnicas de anulación

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



almacenamiento protección sup. pantallas sellado
solidific/estabiliz vitrificación incineración pirolisis

Técnicas de anulación

Técnicas de anulación del suelo

- almacenamiento
- protección superficial
- pantallas de aislamiento
- sellado in situ
- solidificación/estabilización
- vitrificación
- incineración
- pirolisis



almacenamiento protección sup. pantallas sellado
solidific/estabiliz **vitricación** incineración pirolisis

Técnicas de anulación

Vitrificación

(vitrification)

Descripción

Calentamiento > 1.200° C, residuo vítreo

Localización

In situ y ex situ.

Calentamiento > 1.200° C para fundir al suelo junto a contaminantes.

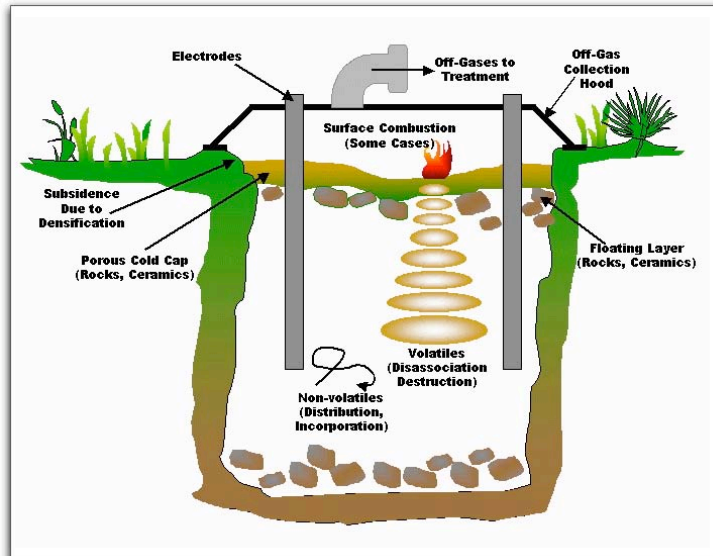
Dstrucción total del suelo, obteniéndose un residuo vítreo como la obsidiana.



almacenamiento protección sup. pantallas sellado
solidific/estabiliz **vitrificación** incineración pirolisis

Técnicas de anulación

In situ



www.ftr.gov/matrix2/section4/D01-4-8b.html

In situ.

Se introducen unos electrodos se conecta corriente eléctrica y el suelo entre ellos se funde.

Los contaminantes inorgánicos quedan vitrificados con el suelo y los orgánicos se transforman en gases (una parte quedan encapsulados y otros migran a la superficie y se pasan a la atmósfera si nada lo impide).

La vitrificación procede desde la superficie hacia abajo.

Poco a poco se van profundizando los electrodos ... Se corta la corriente eléctrica y el fundido solidifica formando un bloque monolítico.

Los gases han de ser capturados en una campana acoplada a un sistema de vacío.

El material vitrificado es muy estable a los agentes químicos y sus lixiviados son mínimos



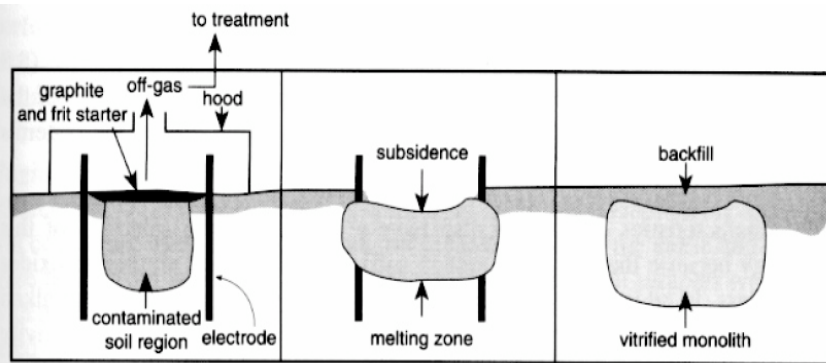
almacenamiento
solidific/estabiliz

protección sup.
vitrificación

pantallas
incineración

sellado
pirólisis

Técnicas de anulación



<http://www2.bren.ucsb.edu/>

Al solidificar se produce un hundimiento y hay que rellenarlo con suelo limpio.

Con esta técnica se va desplazando la vitrificación a celdas continuas para transformar todo el suelo contaminado.

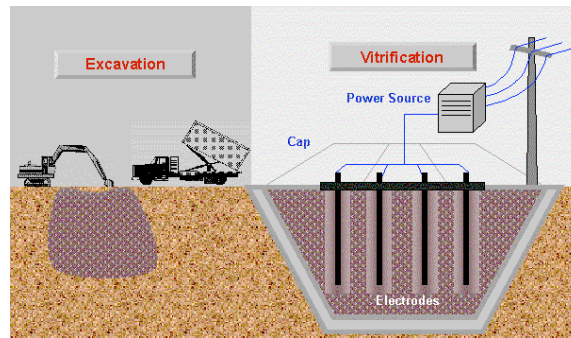
Requiere de 0,7 a 1,1 kWh/kg de suelo.



almacenamiento protección sup. pantallas sellado
solidific/estabiliz **vitrificación** incineración pirolisis

Técnicas de anulación

Ex situ (on site)



www.frtr.gov


Ex situ

Similar al in situ pero en hornos (>1.500°C).

Se excava el suelo y el mismo hueco puede ser utilizado como celda de vitrificación.

Calentamiento por electrodos pero también por otros sistemas como sopletes y resistencias.

La rotación del suelo mejora los resultados.

	almacenamiento	protección sup.	pantallas	sellado
	solidific/estabiliz	vitrificación	incineración	pirolisis

Técnicas de anulación

In situ y ex situ:

- Aplicaciones y ventajas**
 - ⊙ Inorgánicos, PCBs, otros SVOCs, pesticidas y dioxinas.
 - ⊙ Vidrio estable
- Limitaciones e inconvenientes**
 - ⊙ Destrucción total del suelo.
 - ⊙ Gases
- Tiempo** Muy corto
- Costes** Elevado. 800-1.000 \$/m³.

Contaminantes inorgánicos y PCBs, otros SVOCs, pesticidas (DDT) y dioxinas.

Vidrio mucho más estable que en lo que se consigue con solidificación/estabilización.

Se producen abundantes gases que hay que recoger y depurar.

Procedimiento de muy corto plazo

PCBs, bifenilos policlorados

- 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



almacenamiento protección sup. pantallas sellado
solidific/estabiliz **vitrificación** incineración pirolisis

Técnicas de anulación

❑ **Un caso de demostración práctica de la técnica**


Situación inicial

Localización. Michigan (USA)





Localización.

	almacenamiento	protección sup.	pantallas	sellado
	solidific/estabiliz	vitrificación	incineración	pirolisis

Técnicas de anulación


Un caso de demostración práctica de la técnica

Situación inicial

Localización
Parsons Chemical/ETM Enterprises, Grand Ledge, Michigan (USA).

Origen de la contaminación
Pesticidas, metales pesados, PAHs y dioxinas, por industrias fitosanitarias

Origen de la contaminación. Los suelos y sedimentos de la zona fueron contaminados con pesticidas, metales pesados, PAHs y dioxinas, como resultado de la actividad de diversas industrias para la fabricación de productos fitosanitarios instaladas en la comarca.



almacenamiento protección sup. pantallas sellado
solidific/estabiliz **vitrificación** incineración pirolisis

Técnicas de anulación

Un caso de demostración práctica de la técnica

Tratamiento

Técnica. Vitrificación on site.

Procedimiento. Equipo móvil de Geofase Co.

- Electrodos
- Contaminantes orgánicos, inorgánicos y radioactivos.
- In situ y on site

Se utilizó el equipo móvil de Geofase Corporation.

El sistema Geofase utiliza una corriente eléctrica para calentar el suelo contaminado hasta la temperatura de fusión.

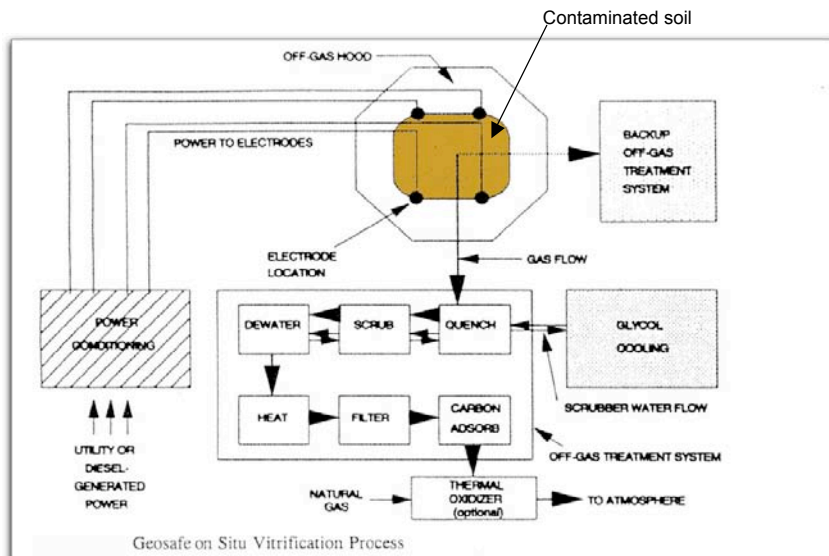
Se trata de una tecnología desarrollada para tratar suelos y residuos mineros con contaminantes orgánicos, inorgánicos y radioactivos. Los compuestos orgánicos son pirolizados a gases simples y recogidos en una unidad para su purificación antes de soltarlos a la atmósfera. Los contaminantes inorgánicos y radioactivos son incorporados a la mezcla que solidifica a un material vítreo similar a la obsidiana.

Geofase puede ser utilizado in situ, introduciendo los electrodos directamente en el suelo contaminado pero generalmente se obtienen mejores resultados trabajando on site, el suelo se excava y se introduce en unas celdas excavadas en el propio terreno.



almacenamiento protección sup. pantallas sellado
solidific/estabiliz vitrificación incineración pirolisis

Técnicas de anulación



www.clu-in.org

Representación horizontal del sistema Geofase.

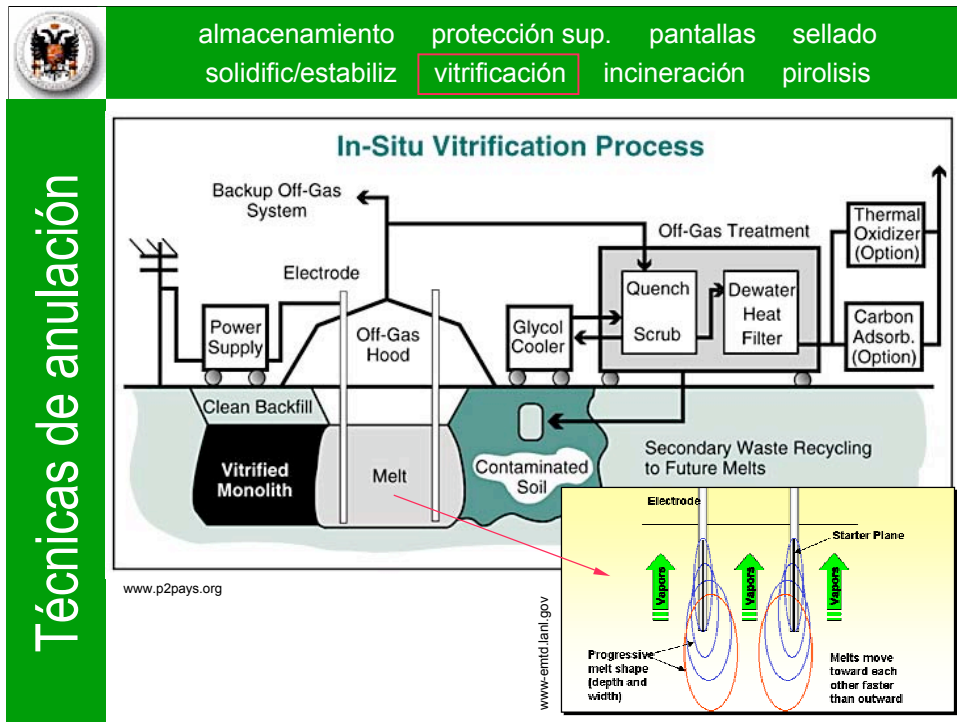
El sistema trabaja con cuatro electrodos situados en los vértices de un cuadrado de unos 5 metros de lado que son insertados en el suelo y lo calientan (lo funden) a 1.600 - 2.000°C.

Necesita de una entrada de corriente eléctrica y para el caso de no tener acceso a una red de distribución puede operar con un generador de electricidad

El equipo está dotado de un sistema para purificar los gases generados antes de emitirlos a la atmósfera. Costa de una unidad de enfriamiento, unidad de limpieza de las partículas arrastradas, eliminación del vapor de agua, filtros de carbón y una unidad de oxidación térmica.

Quench Systems. Acondicionadores de gases (y en menor medida también las partículas) por enfriamiento rápido por inyección en agua.

Scrub = depurador (el mas utilizado es el de efecto de Ventury)



Representación vertical del equipo in situ

La muestra de suelo se va fundiendo formando una capa de 60 cm de espesor y los electrodos se van progresivamente hundiendo para alcanzar mayores profundidades.

Los compuestos orgánicos son pirolizados a gases simples, se desplazan hacia la superficie del suelo y son recogidos en una unidad para su purificado antes de soltarlos a la atmósfera.

Los electrodos son de grafito y al recibir la corriente calientan y funden al suelo situado entre ellos. El suelo fundido es buen conductor de la corriente eléctrica por lo que propaga el proceso a la zonas de alrededor, fundamentalmente hacia abajo y lateralmente. Los electrodos se van profundizando hasta alcanzar las profundidades necesarias.

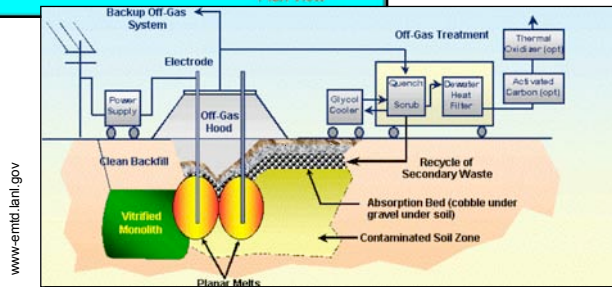
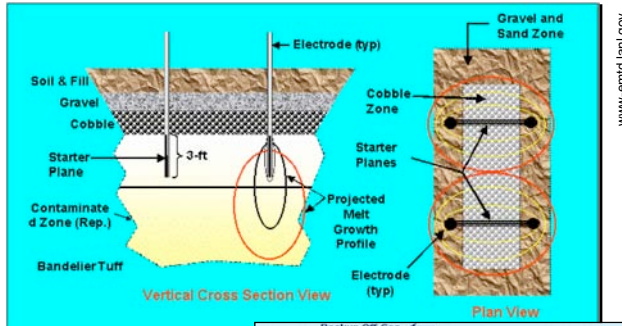
El fundido del suelo se produce a una velocidad de aproximadamente 3 a 4 toneladas a la hora. En un solo sitio se pueden llegar a fundir hasta 1000 toneladas de suelo.

Los electrodos pueden ser introducidos hacia abajo con un movimiento de 2 a 5 cm/hora hasta un máximo de 6 metros.



almacenamiento protección sup. pantallas sellado
solidific/estabiliz vitrificación incineración pirolisis

Técnicas de anulación



En su utilización on site se utiliza el hueco dejado por el suelo a tratar. Se construye una celda de paredes verticales de hormigón. En el fondo se coloca una capa de gravas y piedras de 30 cm de espesor. Se coloca el suelo y los electrodos y se recubre con una capa de unos 60 de piedras y con la superficie final formada por una capa de suelo limpio u otro material de relleno. Las capas de gravas y piedras sirven para aislar el suelo de las zonas limítrofes y la del fondo sirve también como capa de drenaje.



almacenamiento protección sup. pantallas sellado
solidific/estabiliz **vitrificación** incineración pirolisis

Técnicas de anulación



www-emtd.lanl.gov

Equipo de Geofase con la campana para gases y las instalaciones móviles accesorias.



almacenamiento protección sup. pantallas sellado
solidific/estabiliz **vitrificación** incineración pirolisis

Técnicas de anulación

Un caso de demostración práctica de la técnica

Tratamiento

Área a tratar. 2.300 m³.

Contaminantes.

Pesticidas SVOCs halogenados : clordano, dieldrin y DDT.



almacenamiento protección sup. pantallas sellado
solidific/estabiliz **vitrificación** incineración pirolisis

Técnicas de anulación

Contaminant	Máximos en los suelos del sitio mg/kg
g-BHC (Lindane)	78
Bis(2-ethylhexyl) phthalate	28
Butyl benzyl phthalate	6,40
Chlordane	89
4,4'-DDD	48
4,4'-DDE	37
4,4'-DDT	340
Dieldrin	87
Endosulfan sulfate	1,30
Fluoranthene	1,20
Hexachlorobenzene	2,60
Mercury	34
Methoxychlor	0,85
2-Methylnaphthalene	1,10
Phenanthrene	0,99
Pyrene	1,40
2,3,7,8-Tetrachloro-dibenzo-p-dioxin	0,0011
Zinc	150

Ftalatos(2-etilhexil ftalato)

Di-n-Butil ftalato

Dietilftalato

Metoxicloro (insecticida)



almacenamiento protección sup. pantallas sellado
solidific/estabiliz **vitrificación** incineración pirolisis

Técnicas de anulación

Contaminant	Máximos en los suelos del sitio mg/kg	Niveles Genéricos de Referencia mg/kg
g-BHC (Lindane)	78	0,21
Bis(2-ethylhexyl) phthalate	28	49.000
Butyl benzyl phthalate	6,40	6.000
Chlordane	89	0,01
4,4'-DDD	48	0,70
4,4'-DDE	37	0,60
4,4'-DDT	340	0,20
Dieldrin	87	0,01
Endosulfan sulfate	1,30	6
Fluoranthene	1,20	8
Hexachlorobenzene	2,60	0,20
Mercury	34	10
Methoxychlor	0,85	
2-Methylnaphthalene	1,10	
Phenanthrene	0,99	
Pyrene	1,40	6
2,3,7,8-Tetrachloro-dibenzo-p-dioxin	0,0011	0,000002
Zinc	150	1.000

NIVEL GENERICO de REFERENCIA del BOE de 18/01/2005 y Junta de Andalucía



almacenamiento protección sup. pantallas sellado
solidific/estabiliz **vitrificación** incineración pirolisis

Técnicas de anulación

Contaminant	Máximos en los suelos del sitio mg/kg	Niveles Genéricos de Referencia mg/kg	Número de veces que se supera el NGR
g-BHC (Lindane)	78	0,21	370
Bis(2-ethylhexyl) phthalate	28	49.000	
Butyl benzyl phthalate	6,40	6.000	
Chlordane	89	0,01	8.899
4,4'-DDD	48	0,70	68
4,4'-DDE	37	0,60	61
4,4'-DDT	340	0,20	1.699
Dieldrin	87	0,01	8.699
Endosulfan sulfate	1,30	6	
Fluoranthene	1,20	8	
Hexachlorobenzene	2,60	0,20	12
Mercury	34	10	2
Methoxychlor	0,85		
2-Methylnaphthalene	1,10		
Phenanthrene	0,99		
Pyrene	1,40	6	
2,3,7,8-Tetrachloro-dibenzo-p-dioxin	0,0011	0,000002	549
Zinc	150	1.000	

www.cdu-in.org

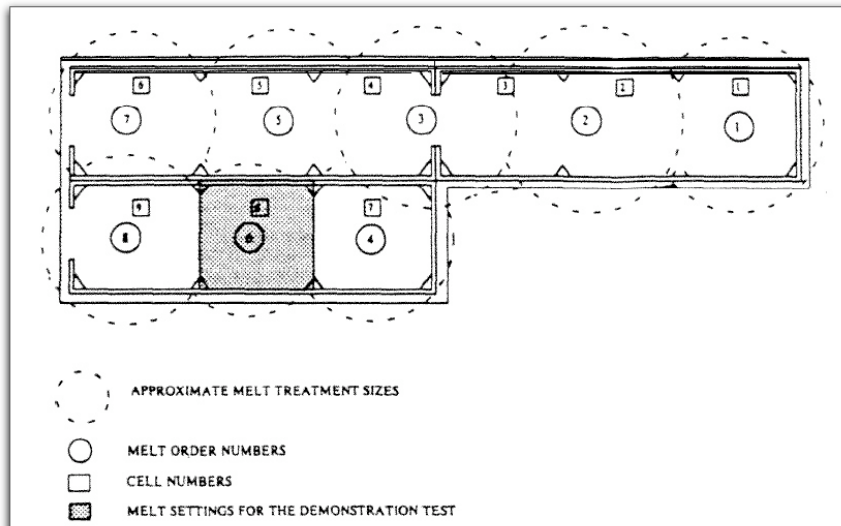
Número de veces que se supera el NGR (Nivel Genérico de Referencia):

(concentración en el sitio - Nivel Genérico de Referencia)/ Nivel Genérico de Referencia



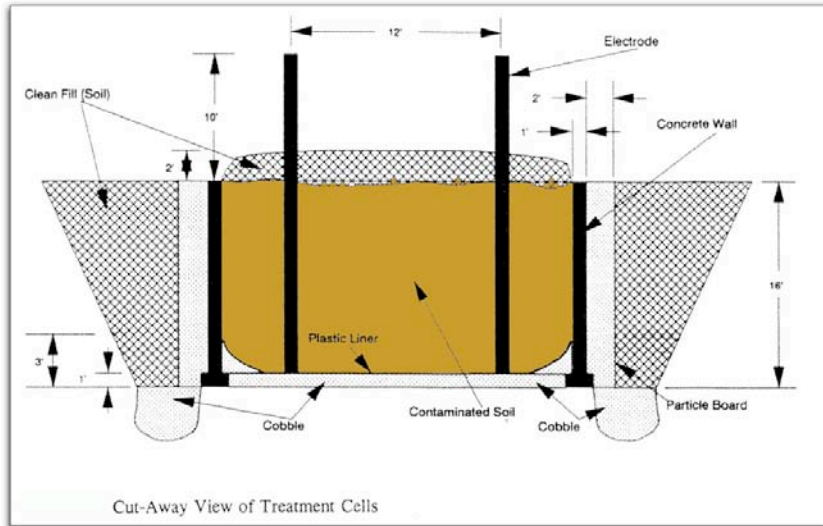
almacenamiento protección sup. pantallas sellado
solidific/estabiliz **vitrificación** incineración pirolisis

Técnicas de anulación



www.clu-in.org

En este sitio la contaminación era muy superficial, 1,5 m o menos. Lo mas económico fue excavar el suelo y preparar 9 celdas forradas de hormigón y guijarros, de 8x8m y 5m de profundidad, dotadas de cuatro electrodos de grafito, separados 5,5 metros, que permiten calentar las muestras de suelo hasta 1.600/2.000°C.



Cada celda se construyó con paredes verticales de hormigón. se separan por su lado externo del suelo limítrofe por una capa de gravas y piedras, que también se colocó en el fondo.

La muestra de suelo va fundiendo formando una capa de 60 cm de espesor y los electrodos se van progresivamente hundiendo para alcanzar mayores profundidades.

Los suelos contaminados fueron excavados, introducidos en las células de fundición y sometidos a altas temperaturas durante 10 a 20 días.

Después, el suelo vitrificado se dejó envejecer durante un año.



El suelo contaminado se excavó



almacenamiento protección sup. pantallas sellado
solidific/estabiliz **vitrificación** incineración pirolisis

Técnicas de anulación



www-emptd.lanl.gov

Se prepararon la celdas para la fundición del suelo



almacenamiento
solidific/estabiliz

protección sup.
vitrificación

pantallas
incineración

sellado
pirólisis

Técnicas de anulación



Para fundir el suelo se utilizan 4 electrodos de grafito que se introducen en el suelo formando un cuadrado de 5,5 m de lado.

Cada electrodo mide 2 metros de largo, con un diámetro de 30 cm y un peso de 14 kg. Puede trabajar con hasta 4 megawatios de electricidad.



Para introducir los electrodos se utilizan unas barrenas metálicas,



que se introducen en el suelo mediante una grúa con una cabeza rotora/percusora



almacenamiento
solidific/estabiliz

protección sup.
vitrificación

pantallas
incineración

sellado
pirolisis

Técnicas de anulación



www.emtd.lanl.gov



almacenamiento
solidific/estabiliz

protección sup.
vitrificación

pantallas
incineración

sellado
pirolisis

Técnicas de anulación



Se introducen los electrodos,



Inicialmente se introducen a 30 ó 60 cm de la superficie y se aplica la corriente eléctrica.

Cuando el suelo funde y se hace conductor se van introduciendo poco a poco cada vez más profundos.



Se tapa la celda de fundición con una campana para extraer los gases y llevarlos a la planta de tratamiento antes de liberarlos a la atmósfera.



almacenamiento
solidific/estabiliz

protección sup.
vitrificación

pantallas
incineración

sellado
pirolisis

Técnicas de anulación



Los suelos contaminados fueron sometidos a altas temperaturas (1000 a 1400°C) durante 10 a 20 días.

Durante este tiempo se consumen de 500.000 a 1.100.000 kilowatios/hora



almacenamiento
solidific/estabiliz

protección sup.
vitrificación

pantallas
incineración

sellado
pirolisis

Técnicas de anulación



www-emtd.lanl.gov

El equipo Geofase en funcionamiento



Después, el suelo vitrificado se dejó envejecer durante un año.



Después de que el tratamiento de vitrificación ha terminado el suelo permanece muy caliente durante mucho tiempo
Durante el proceso de vitrificación el volumen del suelo puede reducirse del orden de un 25 al 50%



almacenamiento
solidific/estabiliz

protección sup.
vitrificación

pantallas
incineración

sellado
pirólisis

Técnicas de anulación



Después del tratamiento el suelo se desconectan los electrodos y el material se deja enfriar. Los electrodos se quedan dentro del suelo, como parte de la muestra y se cortan cerca de la superficie.

Como resultado de la pérdida de porosidad y por la destrucción del humus y los contaminantes orgánicos se produce una importante subsidencia que hace que se necesite de suelo limpio para rellenar el hueco.



El suelo funde como un bloque monolítico similar a un material natural volcánico llamado obsidiana. El material vitrificado es denso y duro y muy resistente a la lixiviación a corto y largo plazo.



El suelo fundido es muy resistente, se calcula que diez veces más que el hormigón. Teniendo en cuenta que el material tiene un comportamiento similar a la obsidiana, los científicos creen que la vida media de este material puede ser superior a los 18 millones de años.

Los test desarrollados por la EPA han demostrado que el suelo vitrificado es resistente a las acciones climáticas de congelación, deshielo, humectación y desecado.

También estos test han probado la carencia de toxicidad de este material ni para los vegetales ni animales.

En resumen: estable, no soluble y no tóxico.

 almacenamiento protección sup. pantallas sellado
solidific/estabiliz **vitrificación** incineración pirolisis

Técnicas de anulación



www.emtd.lant.gov

Si se desea el bloque vitrificado puede ser removido. En este caso un enfriamiento rápido favorece la formación de grietas que fragmentan el material y facilita su extracción y transporte.



almacenamiento protección sup. pantallas sellado
 solidific/estabiliz **vitrificación** incineración pirolisis

Técnicas de anulación

Tratamiento

Table 3. Operational Data

Melt #	Cell #	Soil Treated* (cubic yards)	Duration of Melt (days)	Power Consumed (kilowatt-hours)	Natural Gas Consumed in Thermal Oxidizer (cubic feet)
1	1 and part of 2	300	19.5	1,100,000	N/A
2	2 and part of 3	330	14	934,000	N/A
3	part of 3, 4 and 7	621	16.7	1,018,000	N/A
4	7 and part of 4, 5, and 8	672	16	996,000	N/A
5	5 and part of 4, 6, and 8	655	16	1,084,800	4,100,000
6	8 and part of 5, 7, and 9	377	10	559,200	Not Available
7	6 and part of 5, 8, and 9	575	14	836,985	Not Available
8	9 and part of 6 and 8	426	11.5	640,800	Not Available

Características del suelo. Textura arcillosa limosa y humedad > 30%.

Duración de la operación. 1 año.

Costes. 1.763.000 \$. A un coste unitario de 768 \$/m³ de suelo vitrificado.

El equipo Geofase opera usando energía eléctrica para calentar y fundir el suelo, destruir la materia orgánica, los contaminantes orgánicos por medio de la pirolisis, oxidación y descomposición térmica o inmovilización para los contaminantes muy resistentes.

Por tanto se requiere una entrada de electricidad de un poder máximo de 3,5 MW (1,75 por fase).

Inicialmente la corriente aplicada al suelo es baja (100 a 200 amperios por fase) pero el voltaje es muy alto (4.000 voltios por fase). Sin embargo cuando el fundido del suelo progresa el voltaje decrece y la corriente aumenta conforma el material se va volviendo cada vez más conductor. Cuando el proceso funciona a pleno rendimiento el voltaje es de sólo 600 voltios mientras que la corriente es de 2.900 amperios en cada fase.

El principal requerimiento para esta técnica lo representa el suministro eléctrico. Para la demostración aquí realizada se necesitó 4MW y un voltaje de 13.800 voltios. Esta suministro es estándar en la red de USA, pero si no se dispone de un punto de acceso el suministro puede ser proporcionado por generadores diesel montados en unos camiones- trailers.

La presencia de abundante agua en el suelo dificulta el desarrollo del proceso de vitrificación. En suelos saturados en agua se requiere un calentamiento previo para evaporar el agua, incrementando el tiempo y los costes (los vapores no se pueden liberar directamente a la atmósfera y han de pasar por una planta de tratamiento).

Técnicas de anulación	almacenamiento solidific/estabiliz	protección sup. vitrificación	pantallas incineración	sellado pirolisis	
	<p>Objetivos. Rebajar la contaminación por debajo de los límites EPA y otros,</p> <p style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">Resultado final</p>				
<p><i>Table 7. Selected Results from the SITE Demonstration for Melt #6</i></p>					
	Before-Treatment Soil		After-Treatment Surface Soil		Límites máximos permitidos
Contaminant	Total (µg/kg)	TCLP (µg/L)	Total (µg/kg)	TCLP (µg/L)	Totales µg/kg
Chlordane	<80	<0.5	<80	<0.5	1.000**
4,4'-DDT	2,400-23,100	0.12-0.171	<16	<0.1	4.000**
Dieldrin	1,210-8,330	6.5-10.2	<16	<0.1	80**
Arsenic	8,380-10,100	NA	717-5,490	<4-30.5	300.000*
Chromium	37,400-47,600	NA	12,500-14,600	<10-17.1	1.000.000*
Lead	<50,000	NA	<5,000-21,000	< 50-4,290	2.000.000*
Mercury	2,220-4,760	NA	<40	< 0.2-0.23	30.000*
<i>NA- Not analyzed</i>			* legislaciones europeas; ** EPA		

Objetivos. Rebajar la contaminación de los tres contaminantes mayores por debajo de los límites establecidos por la EPA,

Tabla 7. Valores medios del suelo que se ha cogido para la demostración, celda nº6, (anteriormente se habían dado otros valores mucho mas altos porque se trataba de valores máximos y de todos los suelos de la zona), antes, después y calidad de las emisiones de los gases depurados.

Nivel intervención industrial. As 300.000; Cr 1.000.000; Pb 2.000.000; Hg 30.000 µg/kg.

En cuanto a las concentraciones totales,

Clordano, sin problemas antes ni después en esta celda nº 6 de fundición (<80 antes y después, y límite en 1.000)

4,4'-DDT, en concentración de hasta 23.000 µg/kg antes y <16 (valor de detección) después del tratamiento; el límite en 4.000

Dieldrin, baja desde 8.330 antes del tratamiento a <16 después; límite en 80

POR TANTO ESTA TÉCNICA ES MUY EFECTIVA PARA LA REDUCCIÓN DE LAS CONCENTRACIONES TOTALES DE PESTICIDAS

Arsénico, 10.100 antes y 5.490 después; nivel de intervención en muchas legislaciones 300.000 µg/kg para suelos industriales; sin graves problemas antes ni después

Técnicas de anulación	almacenamiento solidific/estabiliz	protección sup. vitrificación	pantallas incineración	sellado pirolisis	
	<p>Objetivos. Rebajar la contaminación por debajo de los límites EPA y otros,</p> <p style="border: 1px solid gray; padding: 2px; display: inline-block;">Resultado final</p>				
<p><i>Table 7. Selected Results from the SITE Demonstration for Melt #6</i></p>					
	Before-Treatment Soil		After-Treatment Surface Soil		Límites máximos permitidos
Contaminant	Total (µg/kg)	TCLP (µg/L)	Total (µg/kg)	TCLP (µg/L)	Totales µg/kg
Chlordane	<80	<0.5	<80	<0.5	1.000**
4,4'-DDT	2,400-23,100	0.12-0.171	<16	<0.1	4.000**
Dieldrin	1,210-8,330	6.5-10.2	<16	<0.1	80**
Arsenic	8,380-10,100	NA	717-5,490	<4-30.5	300.000*
Chromium	37,400-47,600	NA	12,500-14,600	<10-17.1	1.000.000*
Lead	<50,000	NA	<5,000-21,000	< 50-4,290	2.000.000*
Mercury	2,220-4,760	NA	<40	< 0.2-0.23	30.000*
NA- Not analyzed			* legislaciones europeas; ** EPA		

Cromo, 47.600 antes y 14.600 después; nivel de intervención en muchas legislaciones 1.000.000 µg/kg para suelos industriales; sin graves problemas antes ni después

Plomo <50.000 antes y 21.000 después; nivel de intervención en muchas legislaciones 2.000.000 µg/kg para suelos industriales; sin graves problemas antes ni después

Mercurio 4.760 antes y 0,23 después (volátil); nivel de intervención en muchas legislaciones 30.000 µg/kg para suelos industriales; sin graves problemas antes ni después.

En resumen, todos los contaminantes rebajan sus concentraciones totales en el suelo vitrificado. Pero inicialmente sólo se rebasaban los límites tóxicos para el DDT y Dieldrín, y ambos rebajaron sus concentraciones por debajo de los límites tóxicos después del tratamiento.

En cuanto a los lixiviados que emiten las muestras de suelo antes y después. Pocas variaciones para el clordano y el DDT.

El dieldrín se encuentra en los lixiviados de las muestras de suelo antes de la vitrificación en una concentración de hasta 10,2µg/kg y pasa en los lixiviados del suelo vitrificado a ser <0,1.

El arsénico y los metales pesados no fueron analizados en los lixiviados previos al tratamiento.

La comparación de estas concentraciones de los lixiviados de las muestras vitrificadas con los valores máximos permitidos por la EPA la hacemos en la siguiente pantalla.



almacenamiento protección sup. pantallas sellado
 solidific/estabiliz **vitrificación** incineración pirolisis

Técnicas de anulación

Resultado final

Analyte	Test Result (Average)	Regulatory Limit by EPA Region V.	Units
Treated Soil			
Chlordane	< 80	1,000	µg/kg
4,4-DDT	< 16	4,000	µg/kg
Dieldrin	< 16	80	µg/kg
Mercury	110	12,000	µg/kg
Treated Soil TCLP			
Chlordane	< 0.50	30	µg/L
Mercury	0.18	200	µg/L
Arsenic	13	5,000	µg/L
Barium	440	100,000	µg/L
Cadmium	< 5.0	1,000	µg/L
Chromium	< 10	5,000	µg/L
Lead	1,100	5,000	µg/L
Selenium	< 300	1,000	µg/L
Silver	< 10	5,000	µg/L

Resultados. Los resultados fueron calificados de adecuados.

Esta tabla demuestra la total efectividad en la estabilización de los contaminantes en el suelo vitrificado. Los lixiviados presentan unas concentraciones mas bajas, en varios órdenes de magnitud, que los límites establecidos por EPA para todos los contaminantes. Como indicaban los informes esta técnica produce un producto final realmente estable del que apenas se libera ningún agente contaminante.



almacenamiento protección sup. pantallas sellado
 solidific/estabiliz **vitrificación** incineración pirolisis

Técnicas de anulación

Objetivos. Rebajar la contaminación


- en los gases emitidos por debajo de los límites ARAR.

Table 7. Selected Results from the SITE Demonstration Program for Melt #6

Contaminant	Stack Gas Emissions		State ARAR (lbs/hr)
	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Mass (lbs/hr)	
Chlordane	<1.38	<0.000011	25
4,4'-DDT	<0.28	<0.0000022	0.01
Dieldrin	<0.28	<0.0000022	0.00028
Arsenic	<0.269	<0.000001293	0.00059
Chromium	2.081-3.718	0.0000148-0.0000267	
Lead	<3.891	<0.0000282	
Mercury	12.9-17.7	0.0000989-0.000125	

En cuanto a la calidad de los gases emitidos desde la planta depuradora de Geofase están en todos los contaminantes claramente por debajo de los límites establecidos por el Estado de Pensilvania.

ARAR=Applicable or relevant and appropriate requirements.



almacenamiento solidific/estabiliz	protección sup. vitrificación	pantallas incineración	sellado pirolisis
---------------------------------------	----------------------------------	---------------------------	----------------------

Técnicas de anulación

Table 9. Analytical Results for Confirmation Coring Samples Collected by Geosafe

Drill Hole Identifier	Sample Depth (FT)	Sampled Material	Mercury and Pesticides**	Volatiles	Semivolatiles
DH-101	10	Glass	ND	NA	NA
DH-101	14	Glass	ND	NA	NA
DH-101	18	Containment Soil	NA	ND	ND
DH-101	19	Containment Soil	NA	ND	ND
DH-102	10.5	Glass	ND	NA	NA
DH-102	13.5	Glass	ND	NA	NA
DH-102	17	Containment Soil	NA	NA	NA
DH-103	9	Glass	ND	NA	NA
DH-103	12	Glass	ND	NA	NA
DH-103	15	Containment Soil	NA	ND	ND
DH-103	16	Containment Soil	NA	ND	ND

ND= None Detected (detection limit not provided)
 NA= Not Analyzed
 *Specific pesticides, volatiles, and non-volatiles analyzed for this application were not identified in the available references.
 **Results shown for mercury and pesticides are based on TCLP analysis.

Valores del test TCLP al año de realizar el tratamiento

Muestras tomadas un año después del tratamiento usando el test TCLP.

Una vez conocida la eficacia de esta técnica frente a la inmovilización/destrucción de los contaminantes y adecuada depuración de los gases emitidos tras la depuración, cabe ahora preguntarse como evolucionará el residuo vítreo con el tiempo. Para contestar a esta cuestión se hizo un muestreo de comprobación transcurrido un año del tratamiento. Y aunque claramente este tiempo se queda corto para evaluar la estabilidad futura del producto, al año PRÁCTICAMENTE NO SE LIBERA NINGUNA CONCENTRACIÓN DETECTABLE PARA NINGÚN CONTAMINANTE EN NINGUNA DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS.

LA TÉCNICA ES PUES COMPLETAMENTE FIABLE.

Las muestras DH101 corresponden a una cata efectuada en la celda de vitrificación nº 1; las muestras DH102 son de la celda nº3; y la DH103 en el límite entre las celdas 5 y 7. Se eligieran expresamente la celdas en las que se sospechaba que la vitrificación pudo no ser completa en algunas zonas.