



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	vitrificación	incineración	pirolisis

Técnicas de anulación

Incineración

(incineration)

- Descripción**
 - Combustión, 870-1.200°C
 - Destrucción total

- Localización**
 - Ex situ (on site y off site).

Calentamiento, 870-1.200°C en un horno para quemar los contaminantes.

Destrucción total suelo y contaminantes, dando gases y cenizas.

COMBUSTION. Calentamiento hasta la quema de los contaminantes.

Volatiliza y produce la combustión de los contaminantes en presencia de oxígeno (a diferencia de la pirolisis).

Destruye el suelo pero reduce los residuos al mínimo (cenizas y gases)

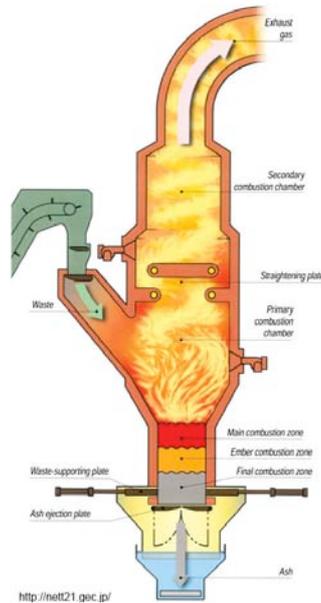
Muy rápido y efectivo; VOCs (compuestos orgánicos volátiles), SVOCs (compuestos orgánicos semivolátiles), PCBs (bifenilos policlorados), fuels, disolventes, y pesticidas.

On site u off site, pero siempre el método es ex-situ.



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

Técnicas de anulación



Se utiliza un horno para producir la combustión. Típicamente el horno de combustión consta de dos cámaras.

Básicamente, en una primera cámara se volatilizan los contaminantes y los contaminantes transformados en gases pasan a una segunda cámara de combustión (SCC) donde se queman y se destruyen a productos mas simples: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{otros gases} + \text{cenizas}$.

En la primera cámara también se queman los compuestos menos estables y pueden encontrarse compuestos orgánicos resistentes y productos intermedios de combustión incompleta (PICs). Para aumentar la eficacia en la combustión de todos los compuestos se utiliza la segunda cámara. Como resultado de la combustión se origina un residuo sólido constituido por unas cenizas en el fondo de las cámaras que por gravedad se separan y se enfrían para su posterior manejo.

Durante la combustión se pueden formar compuestos orgánicos parcialmente transformados muy nocivos y cancerígenos (dioxinas y furanos).

Los gases producidos durante la combustión, con productos originales y compuestos a medio transformar representan un gravísimo problema para esta técnica.



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

Técnicas de anulación

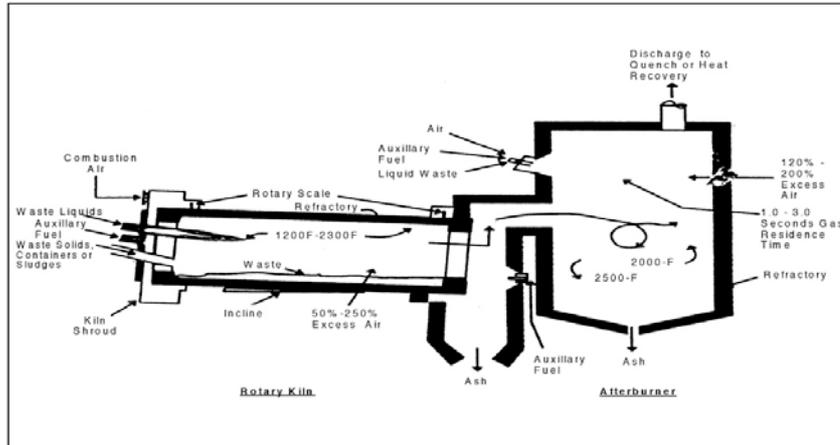


Figure 1 : Typical Rotary Kiln Incinerator (adapted from EPA-530-R-94-014)

DISEÑO DE LOS INCINERADORES

El mas frecuente es el de rotación

Su primera cámara consta de un tubo cilíndrico metálico revestido por dentro de material refractario anticorrosivo sobre unos rodamientos que facilitan el giro según un eje casi horizontal. Tiene un tamaño: 2 a 4 metros de diámetro y 7 a 30 metros de largo.

Velocidad de rotación y el tiempo de residencia actúan de modo inverso. El tiempo va de 30 a 80 minutos y la velocidad de 30 a 120 revoluciones/hora. También influye en el grado de combustión producida la inclinación, típicamente de 2 a 4°.

Su temperatura es de unos 650°C y la capacidad calorífica: de 10 a 120 millones BTU /hora.*

El suelo contaminado entra por cinta transportadora desde la izquierda y se desplaza dentro del tubo por la inclinación.

Después pasa a la segunda cámara. Su tamaño: de 3 a 6 metros de diámetro y de 9 a 12 m de largo. El tiempo de residencia ahora se reduce a 1 y 3 segundos. Su temperatura es mas alta que la de la primera (900 - 1000°C).

Excesivas cantidades de contaminantes fácilmente combustibles o tendentes a la explosión pueden producir sobrepresiones en la cámara y escaparse los gases a medio tratar por las juntas y válvulas. Para evitar este problema muchos incineradores llevan una válvula de seguridad ¡que vierte directamente los gases a la atmósfera! (pero solo una pequeña parte y no todos los gases de la cámara se ven afectados).

*BTU = British Thermal Unit. Una BTU representa la cantidad de energía que se requiere para elevar a un grado Fahrenheit la temperatura de una libra de agua en condiciones atmosféricas normales. Una BTU equivale aproximadamente: a 252,2 calorías y a 1055 julios

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

Técnicas de anulación



Los incineradores pueden liberar a la atmósfera gran cantidad de gases muy tóxicos.

Han creado una gran alarma con un completo rechazo social.

Pero los incineradores modernos llevan acoplados unos sistemas muy completos para depurar los gases antes de emitirlos a la atmósfera.

¿Consiguen depurarlos completamente?. Unos dicen que sí y otros se oponen frontalmente.

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

Técnicas de anulación

visita-una-incineradora-virtua.swf (application/x-shockwave-flash Objeto)

http://www.greenpeace.org/raw/content/espana/funciones/animaciones/visita-una-incineradora-virtua.swf

The GREENPEACE Incinerator Tour - What the operators don't tell you

Visita a una planta incineradora. Lo que nunca te contaron sobre la incineración de residuos.
 Bienvenido al "Tour" de Greenpeace. Si quieres descubrir paso a paso los problemas que genera la incineración acompáñanos en nuestra visita. Para acceder a las diferentes partes de la planta pulsa los botones que tienes debajo.

1	Llega la basura	4	Tolvas de alimentación	7	Cenizas de fondo	10	Cenizas volantes
2	Foso de residuos	5	Parrilla de incineración	8	Tratamiento de gases	11	Chimenea
3	Puentes grúa	6	Horno	9	Filtros	12	Turbinas

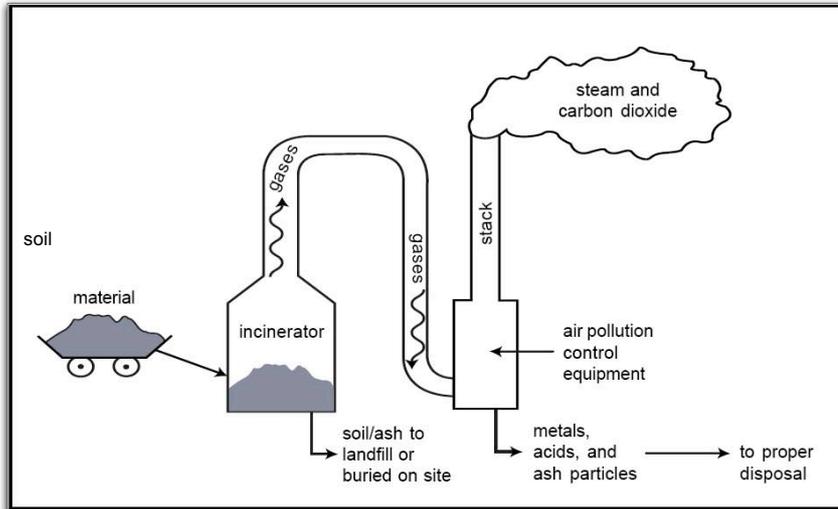
Terminado

Los ecologistas de GreenPeace tienen una visión muy negativa al respecto.



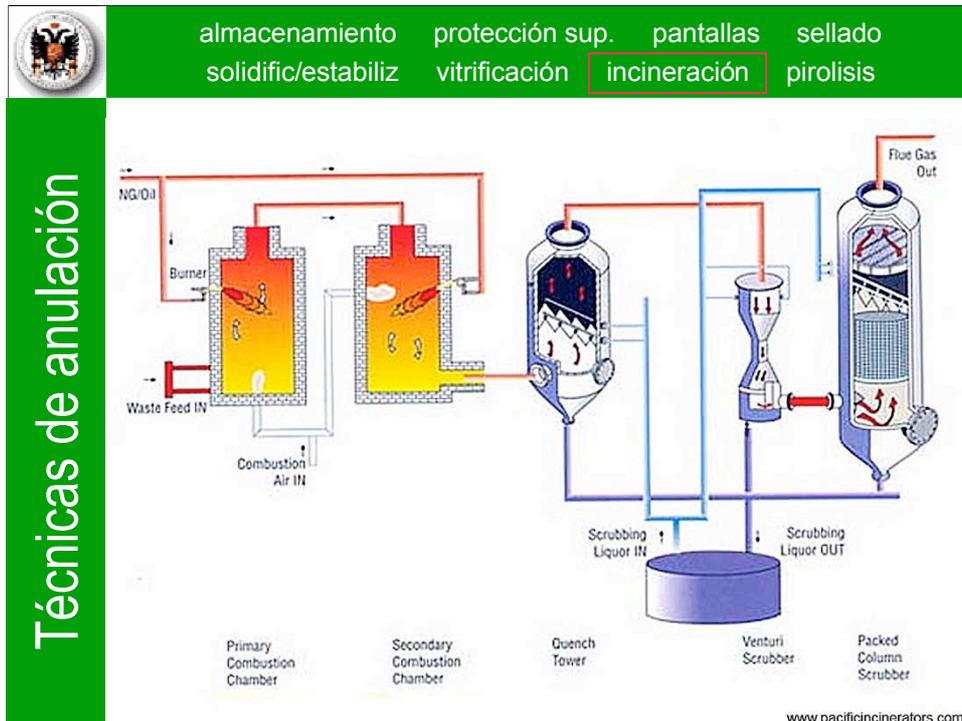
almacenamiento solidific/estabiliz protección sup. vitrificación pantallas incineración sellado pirolisis

Técnicas de anulación



www.cluin.org

Además del horno de combustión en un incinerador juega un papel muy importante la planta de depuración de los gases, conectado siempre a la salida de la segunda cámara de combustión.



La planta de depuración de gases tiene por objetivos neutralizar gases y atrapar las partículas suspendidas.

Está constituida por una serie de unidades con diferente funcionamiento y eficacia que se combinan según el tipo de contaminantes.

Su eficacia es función de una serie de factores, principalmente: temperatura, tiempo de residencia, contaminantes a tratar, turbulencia para mezclar contaminantes y agentes, e inyección de oxígeno (aire).

La temperatura, para la combustión de la mayoría de los compuestos orgánicos, basta los 600-650°, pero por seguridad los incineradores trabajan desde 650 hasta los 1650°.

Tiempo de residencia de 30 a 90 minutos para sólidos y de 0,5 a 2 segundos para líquidos.

Los equipos de depuración de gases suelen trabajar a presiones negativas para dificultar las fugas de gases.

Hay cinco tipos diferentes: separadores ciclónicos (cyclone separators), acondicionadores (gas conditioners -quench- systems), de sacos múltiple (baghouses), de efecto Venturi (scrubbers), y de neblina (mist eliminators).

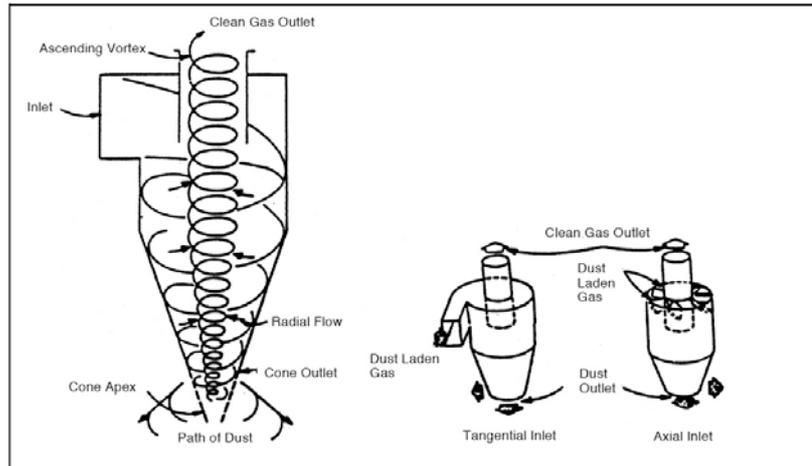


Figure 3: Typical Cyclone (adapted from EPA-530-R-94-014)

Separadores clónicos. Su objetivo fundamental es separar las partículas en suspensión.

Son unas cámaras cilíndricas o cónicas colocadas en posición vertical.

El gas con las partículas en suspensión entra por la parte alta y es inyectado hacia abajo en espiral formando un torbellino que expulsa partículas aceleradas contra las paredes (por la fuerza centrífuga). Las partículas descienden por gravedad por las paredes formando una fina lamina que resbala y se recogen al final del embudo.

Al llegar al fondo la dirección de circulación se invierte y el gas limpio asciende por el centro.

Este sistema es valido para partículas de unas 5 micras o mayores (variable en función de velocidad gas y forma y densidad de las partículas).



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

Técnicas de anulación

Gas Conditioners (Quench) Systems



Acondicionadores de gases (y en menor medida también de partículas).
Quench Systems.

Quench = enfriamiento rápido por inyección en agua.

Se inyecta agua pulverizada conteniendo determinados agentes reactivos sobre la corriente del gas contaminado en un recipiente. Al evaporarse el agua se produce una disminución drástica de la temperatura y los gases se licuan.

Con este proceso se limita la posibilidad de formación de dioxinas y furanos (al enfriarse rápidamente).

Las gotas de agua y otros líquidos se adhieren a las paredes del equipo formando una fina lamina que atrapa también a las partículas y que se retira fácilmente desde el fondo del recipiente.



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

Técnicas de anulación

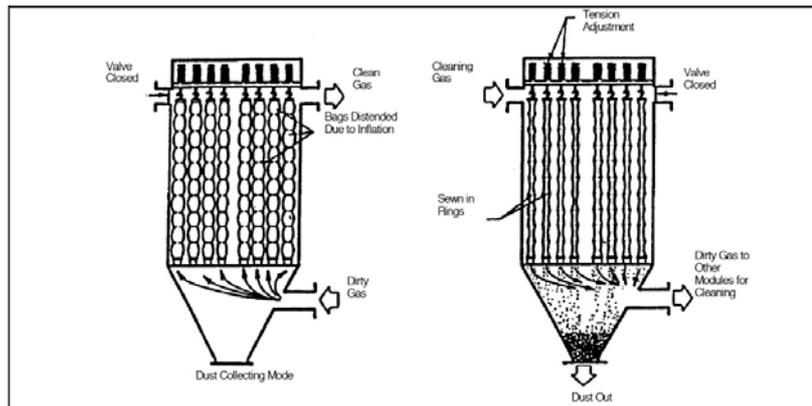


Figure 4: Typical Reverse-Air Baghouse (adapted from EPA-530-R-94-014)

Depuradores de filtros de sacos múltiples (Baghouses). Son para separar las partículas suspendidas.

Los gases atraviesan una serie de pequeños sacos de material poroso y las partículas van quedando retenidas formando una especie de tortas dentro de los saquitos.

La temperatura se mantiene entre 200 y 350°C para evitar la formación de dioxinas.

Para limpiar los filtros se invierte sentido de circulación y se arrastra el polvo acumulado.



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

Técnicas de anulación

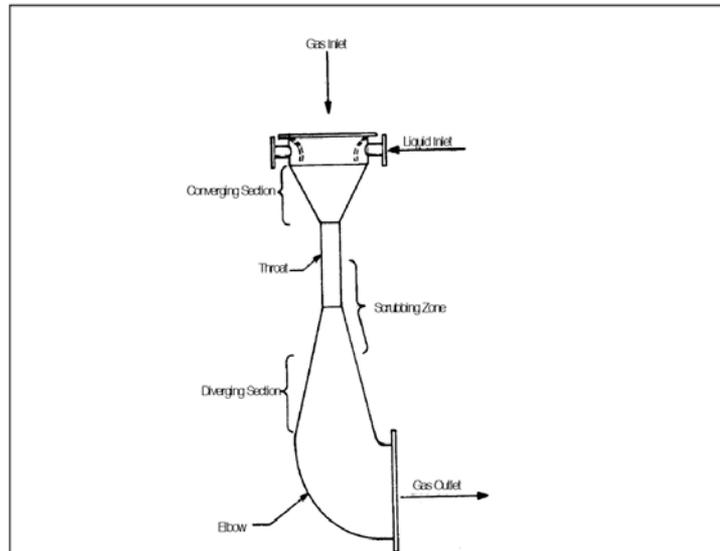


Figure 5: Typical Venturi Scrubber (adapted from Buonicore, A.J. and W.T. Davis, *Air Pollution Engineering Manual*, 1992)

Depuradores de efecto Venturi (Wet scrubbers). Se utilizan para separar partículas y gases solubles.

El gas se introduce en una unidad con un conducto que se va estrechando y luego se ensancha. Junto al gas se inyecta por la parte superior un líquido. Al llegar al cuello del embudo los gases se aceleran, causando la atomización del líquido. La mezcla de gas, líquido y gotas entra en la parte ancha y se desacelera, se expande y las gotas se adhieren entre sí y caen por gravedad. El resto pasa a otra unidad depuradora, concretamente un depurador de neblina, donde se separan las pequeñas gotas que quedan.

Para favorecer la condensación la zona ancha (parte inferior) se rellena de pequeñas esferas que incrementa las zonas de contacto entre el gas y el líquido que rodea a las bolitas.



Depurador de neblina (Mist Eliminators).

Son utilizados para separar las finas gotitas líquidas suspendidas en el gas.

El gas atraviesa una fina malla de hilos que por un lado permite el paso del gas y por otro proporciona un amplio contacto del gas con los hilos de la malla para favorecer la retención de las gotitas arrastradas en el gas.

Se suelen utilizar al final de los depuradores de efecto Venturi.

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

Técnicas de anulación

❑ **Aplicaciones y ventajas**

- Muy efectivo y muy rápido. Técnica muy utilizada.
- Cuando fallan otras técnicas.
- Destrucción de un amplio abanico de contaminantes
- Residuo muy reducido en volumen.
- Suelos altamente contaminados y peligrosos.
- Generalmente on site.

Aplicaciones y ventajas

- ☞ Técnica muy utilizada si bien actualmente tiende a ser reemplazada por otras técnicas dado el rechazo generalizado de los ciudadanos.
- ☞ Puede destruir contaminantes que no pueden ser eliminados por otras técnicas.
- ☞ Destrucción de un amplio abanico de contaminantes: inorgánicos, metales pesados, radioisótopos, VOCs, SVOCs, PBCs, carburantes, disolventes y pesticidas.
- ☞ El material después del tratamiento queda muy reducido en volumen.
- ☞ Muy utilizado para eliminar suelos altamente contaminados y peligrosos.

Se ha utilizado en 40 Superfund sitios.



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

Técnicas de anulación

□ Limitaciones e inconvenientes

- ⊙ Destrucción total.
- ⊙ Peligrosidad productos secundarios.

GASES

- ⊙ Compuestos orgánicos parcialmente transformados y nocivos.
- ⊙ Nuevos productos químicos nocivos y cancerígenos (dioxinas y furanos).
- ⊙ Metales pesados volátiles Hg, Cd, As y Pb migran

SÓLIDOS

- ⊙ Cenizas con metales pesados.

Limitaciones e inconvenientes

- ✓ Destrucción total del suelo.
- ✓ Serios problemas con los productos secundarios formados. Control muy complejo.

GASES

- ✓ Posible aparición de compuestos orgánicos parcialmente transformados y nocivos.
- ✓ Posible formación de nuevos productos químicos nocivos y cancerígenos (dioxinas y furanos; Cl y con metales).
- ✓ Algunos metales pesados volátiles como Hg, Cd, As y Pb no se descomponen y pueden migrar.

SÓLIDOS

- ✓ Cenizas con metales pesados que conservan la toxicidad y hay que estabilizarlos/ solidificarlos antes de almacenarlos en el vertedero.

	almacenamiento solidific/estabiliz	protección sup. vitrificación	pantallas incineración	sellado pirolisis
Técnicas de anulación	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Tiempo. Muy corto. <input type="checkbox"/> Costes <ul style="list-style-type: none"> ⊙ Moderados a altos ⊙ 220 - 1.100 \$/m³ 1.650 - 6.600 \$/m³ con PCBs y dioxinas. 			

Procedimiento muy rápido.

De coste moderados a altos, pero el proceso on site rebaja sensiblemente los costes.

220/1.100 \$/m³, pero la presencia de PCBs y dioxinas encarece el proceso (1.650-6.600 \$/m³).



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

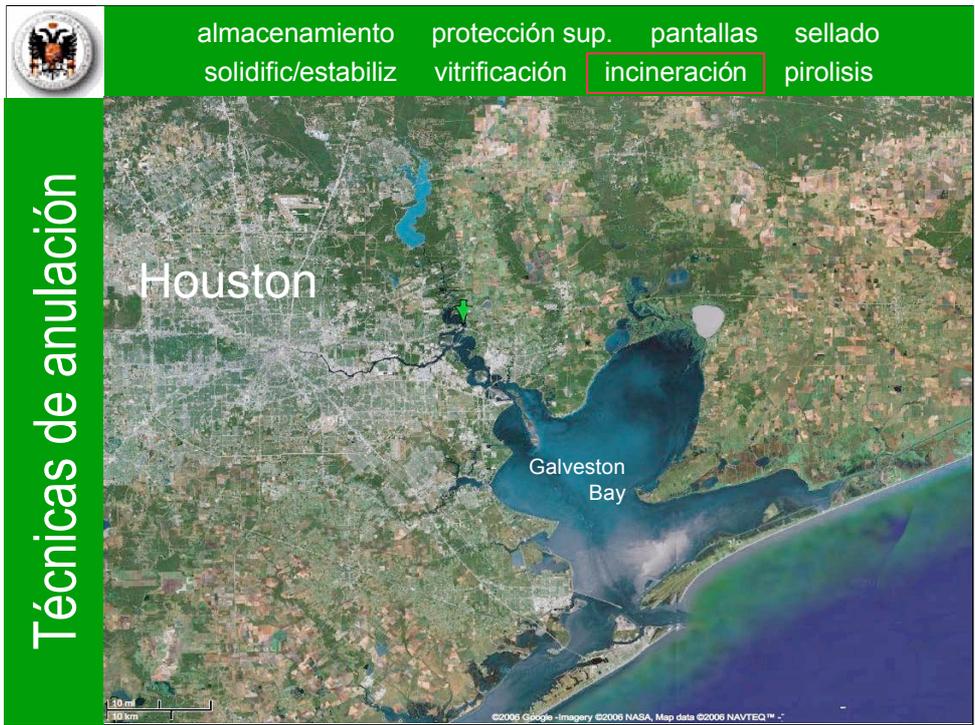
Técnicas de anulación

❑ **Caso práctico 1**

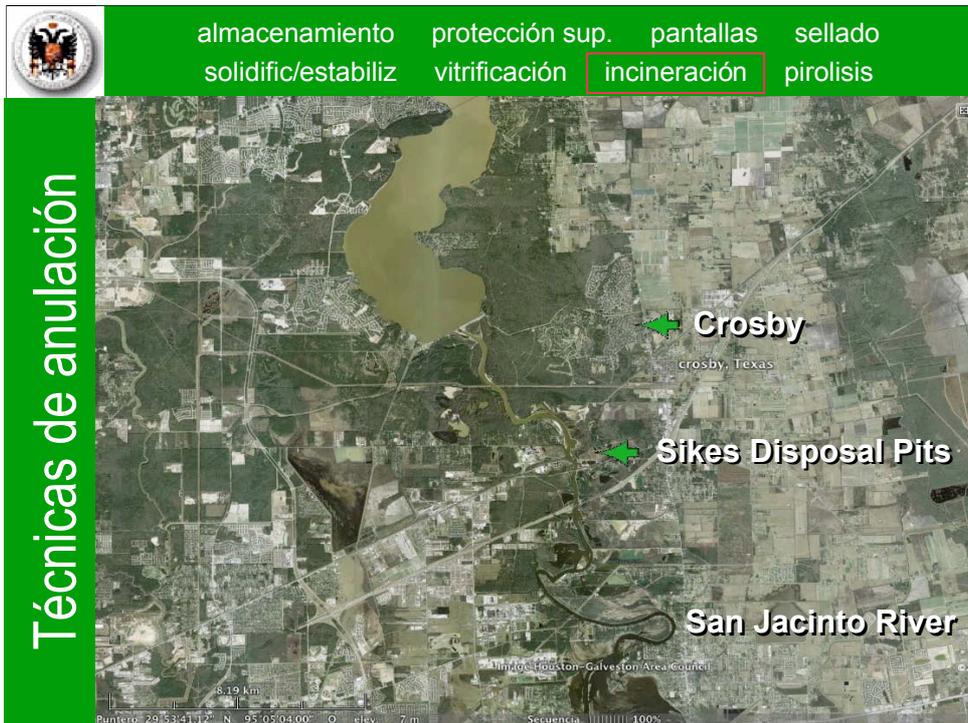
1. Identificación

Localización. Texas





Sikes Disposal Pits se encuentra a unos 20 km al este de Houston



Sikes Disposal Pits se encuentra a unos 3 km al suroeste de Crosby



almacenamiento
solidific/estabiliz

protección sup.
vitrificación

pantallas
incineración

sellado
pirolisis

Técnicas de anulación

❑ Caso práctico 1

1. Identificación

Localización. Sikes Disposal Pits, Crosby, Houston, Texas, USA.

Técnica. Incineración on site.

Contaminantes. Compuestos orgánicos: fenoles, naftaleno, clorobenceno, creosoles, tolueno, xileno, dicloroetano y cloruro de vinilo.



almacenamiento
solidific/estabiliz

protección sup.
vitrificación

pantallas
incineración

sellado
pirolisis

Técnicas de anulación

Caso práctico 1

2. Historial de la contaminación

Origen de la contaminación



Situado en el lado norte de la U.S. Highway 90

En la llanura de inundación del río San Jacinto existe una primitiva área de extracción de arenas para la construcción. Quedando, como resultado numerosos fosos.

En la década de 1960 se utiliza como vertedero incontrolado. La industria petroquímica vierte numerosos residuos químicos. Vertidos libres y en bidones. (se estima que se acumularon unos 1.500 bidones de 200 litros). Con el tiempo el contenido de los bidones envejecen, pierde gran parte de sus VOC y al contacto con el aire se forma una especie de alquitrán.

Como resultado aparece en la zona una intensa contaminación en los suelos, sedimentos, aguas subterráneas y superficiales. La contaminación se extiende desde la superficie hasta los 5 m de profundidad. Contaminando fuertemente al acuífero superficial y ligeramente a un segundo acuífero situado a los 20 m y nada, por el momento, al acuífero profundo, situado a 42 m, del que se realizan captaciones para el suministro de agua para la ciudad de Houston y por tanto representado un seria amenaza.



Situación exacta del sitio



almacenamiento
solidific/estabiliz

protección sup.
vitrificación

pantallas
incineración

sellado
pirolisis

Caso práctico 1

2. Historial de la contaminación

Origen

Fase previa

- 1981 Investigación por la EPA
- 1982 Muestreo preliminar (xileno, benceno, creosoto, tolueno)
- 1983 Inclusión del sitio en el Listado Nacional de Prioridades
- Limpieza preliminar. Retirada de bidones, excavación de suelos y arenas fuertemente contaminados y transferencia a un vertedero controlado (unos 340 m³)
- Recolocación de las familias con hogares próximos.



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

Técnicas de anulación

☐ Caso práctico 1

Record of Decision

Identifica los siguientes riesgos y amenazas:

- Contacto directo con los lodos y suelos contaminados
- Consumo de agua subterránea contaminada
- Contacto directo con las aguas superficiales
- Inhalación de compuestos tóxicos



almacenamiento
solidific/estabiliz

protección sup.
vitrificación

pantallas
incineración

sellado
pirolisis

❑ Caso práctico 1

Estudio de viabilidad (Feasibility Study). 1983

Se proponen seis posibles alternativas

- 1) No acción
- 2) Almacenamiento en vertedero off site de lodos y tratamiento on site de suelos.
- 3) Incineración on site de lodos, tratamiento on site de suelos y de las cenizas resultantes.
- 4) Incineración on site de lodos, almacenamiento en vertedero off site de suelos y de cenizas resultantes.
- 5) Incineración on site de lodos y suelos, almacenamiento en vertedero on site de cenizas resultantes.
- 6) Recubrimiento y pantallas de protección.



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

Técnicas de anulación

☐ **Caso práctico 1**

Record of Decision

Objetivos

- Prevenir el contacto humano con los suelos contaminados, los lodos y las aguas superficiales
- Minimizar el impacto de las aguas de escorrentía
- Minimizar el impacto en el Río San Jacinto y en la Bahía Jackson
- Prevenir el uso del agua contaminada de los acuíferos
- Proteger de la contaminación al acuífero más profundo

Técnicas de anulación	 almacenamiento solidific/estabiliz protección sup. vitrificación incineración pantallas sellado pirolisis					
	Alternativas	No acción	Vertedero	Fijación on site	Incineración on site	Recubrimiento y pantallas
1	x					
2			lodos off	suelos		
3				suelos cenizas	lodos	
4			suelos off cenizas off		lodos	
5			cenizas on		lodos suelos	
6						x

Objetivos (Record of Decision)

- Prevenir el contacto humano con los suelos contaminados, los lodos y las aguas superficiales
- Minimizar el impacto de las aguas de escorrentía
- Minimizar el impacto en el Río San Jacinto y en la Bahía Jackson
- Prevenir el uso del agua contaminada de los acuíferos
- Proteger de la contaminación al acuífero más profundo

Para cubrir los objetivos planteados sólo se puede conseguir con la alternativa 5



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

Técnicas de anulación

❑ Caso práctico 1

Estudio de viabilidad (Feasibility Study). 1983

Se proponen seis posibles alternativas

- 1) No acción
- 2) Almacenamiento en vertedero off site de lodos y tratamiento on site de suelos.
- 3) Incineración on site de lodos, tratamiento on site de suelos y de cenizas resultantes.
- 4) Incineración on site de lodos, almacenamiento en vertedero off site de suelos y de cenizas resultantes.
- 5) Incineración on site de lodos y suelos, almacenamiento en vertedero on site de cenizas resultantes.**
- 6) Recubrimiento y pantallas de protección.

Record of Decision. 1986: Alternativa 5

Tras su presentación pública durante cinco semanas y posterior discusión, se decide por la opción que proponía EPA muy pocas discrepancias.

Esto es lo referente a los suelos. También se eligieron unas medidas para las aguas:

- Tratamiento de las aguas superficiales antes de descarga
- Prohibición de usar el acuífero superficial del sitio
- Vigilar el acuífero profundo y prohibir las captaciones si se degrada.



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

Técnicas de anulación

❑ Caso práctico 1

3. Plan de actuación

Análisis de la situación

Extensión de la contaminación. 75 ha, aprox.

Concentraciones de los contaminantes

	máximas en Sikes (mg/kg)	NGR Uso industrial (mg/kg)	NGR Uso urbano (mg/kg)	NGR Todo uso (mg/kg)
Naftaleno	58	10	8	1
Clorobenceno	2,3	35	10	1
Tolueno	5	100	30	3
Dicloroetano	20	5	0,5	0,05
Cloruro de vinilo	1	1	0,1	0,01

NGR = Nivel Genérico de Referencia BOE 18/01/05

Son niveles de referencia no de intervención.

En general, contaminantes muy tóxicos, especialmente el cloruro de vinilo y el dicloroetano.



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

Técnicas de anulación

❑ Caso práctico 1

3. Plan de actuación

Análisis de la situación

Extensión de la contaminación. 75 ha, aprox.

Concentraciones de los contaminantes

	máximas en Sikes (mg/kg)	NGR Todo uso (mg/kg)	Número de veces que se supera el NGR
Naftaleno	58	1	57
Clorobenceno	2,3	1	1
Tolueno	5	3	<1
Dicloroetano	20	0,05	399
Cloruro de vinilo	1	0,01	99

NGR = Nivel Genérico de Referencia *BOE 18/01/05*

Número de veces que se supera el NGR (Nivel Genérico de Referencia):
(concentración en el sitio - NGR) / NGR



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

❑ **Caso práctico 1**

3. Plan de actuación

Análisis de la situación

Características de los suelos.

Textura, horizontes arenosos con niveles arcillosos.

Humedad, 10-12%

Densidad aparente, 1,58 a 1,72 g/cm³.



almacenamiento
solidific/estabiliz

protección sup.
vitrificación

pantallas
incineración

sellado
pirolisis

Técnicas de anulación

❑ Caso práctico 1

3. Plan de actuación

Planteamientos previos

Ensayos previos de incineración. 1992

Método operativo

1. Cercado de la zona para protección.
2. Retirada de bidones, trituración y mezcla.
3. Excavación e incineración on site de suelos y residuos fuertemente contaminados (>10 mg/kg total de VOCs, o 100 mg/kg de PAHs).

VOC= compuestos orgánicos volátiles: tolueno, dicloroetano

PAHs = Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (naftaleno)



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

Técnicas de anulación

Método operativo (ROD).

❑ Caso práctico 1

1. Cercado de la zona para protección.
2. Retirada de bidones, trituración y mezcla.
3. Excavación e incineración on site de suelos y residuos.
4. Tratamiento de incineración en un horno rotativo
De 23 m de largo y 4 m de diámetro; a 700°C y dos SCC .
La intensidad de alimentación fue de 29 tn / hora con un tiempo de residencia de 45 minutos.
El consumo energético fue de 120 millones de BTU/hr.
Todo el equipo se mantuvo bajo una presión negativa para evitar fugas de gases tóxico
5. Post-tratamiento de las cenizas.
6. Post-tratamiento de los gases.
7. Post-tratamiento de las aguas.

SCC = cámaras secundarias

5. TRATAMIENTO DE LAS CENIZAS. Las cenizas fueron tratadas en un sistema de depuración y fueron testeadas con el método TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure).
- 6 y 7. POST-TRATAMIENTO DE LOS GASES Y DE LOS LIQUIDOS: Los gases y los líquidos originados en el proceso de incineración fueron transferidos a un sistema depurador constituido por una sucesión de unidades.

Un acondicionador de gases, tipo quench, (enfriamiento rápido por inyección en agua), y para separar las partículas un depurador de efecto venturi y un separador ciclónico.



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

Técnicas de anulación

❑ Caso práctico 1

4. Resultados

Concentraciones finales

Las cenizas han de superar el test TCLP antes de enterrarlas.

TCLP

Constituent	Regulatory Concentration (mg/L)	Residual Ash Sikes TCLP concentration (mg/L)
Arsenic	5.0	< 0.5
Barium	100.0	< 10.0
Cadmium	1.0	< 0.1
Chromium	5.0	< 0.5
Lead	5.0	< 0.5
Mercury	0.2	< 0.02
Selenium	1.0	< 0.1
Silver	5.0	< 0.5

En las cenizas se controlaron los metales. Las concentraciones de metales en los lixiviados TCLP de las cenizas estuvieron siempre por debajo de los límites establecidos.



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

Técnicas de anulación

Método operativo (ROD).

❑ Caso práctico 1

1. Cercado de la zona para protección.
2. Retirada de bidones, trituración y mezcla.
3. Excavación e incineración on site de suelos y residuos.
4. Tratamiento de incineración en un horno rotativo
5. Post-tratamiento de las cenizas.
6. Post-tratamiento de los gases.
7. Post-tratamiento de las aguas.
8. Rellenado de las áreas excavadas con las cenizas.
9. Recubrimiento de los restos de la incineración con una capa de suelo limpio y siembra de vegetación.
10. Tratamiento y protección de los acuíferos.
11. Prohibición de utilización del acuífero superficial y subsuperficial hasta su restauración (vigilancia de al menos 30 años).
12. Seguimiento del acuífero profundo y prohibición de su uso si se detecta contaminación.



almacenamiento
solidific/estabiliz

protección sup.
vitrificación

pantallas
incineración

sellado
pirolisis

❑ **Caso práctico 1**

4. Resultados

Concentraciones finales

Situación final

En diciembre de 1994 concluyen las operaciones.

Se desmonta el incinerador y se desmantela el edificio de trituración y mezcla.

La superficie del relleno de las cenizas se recubre con una capa de 50 cm de suelo limpio que a su vez se recubre de 15 cm de suelo orgánico.

Se siembran especies autóctonas.



almacenamiento
solidific/estabiliz

protección sup.
vitrificación

pantallas
incineración

sellado
pirolisis

Caso práctico 1

4. Resultados

Concentraciones finales

Situación final

Cantidad de material tratado

Unas 450.000 tn de suelos y residuos.

Periodo del tratamiento

18 meses, desde febrero 1992 a junio de 1994.

Costes

115.000.000 \$. Con un coste unitario de 230 \$/tn



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

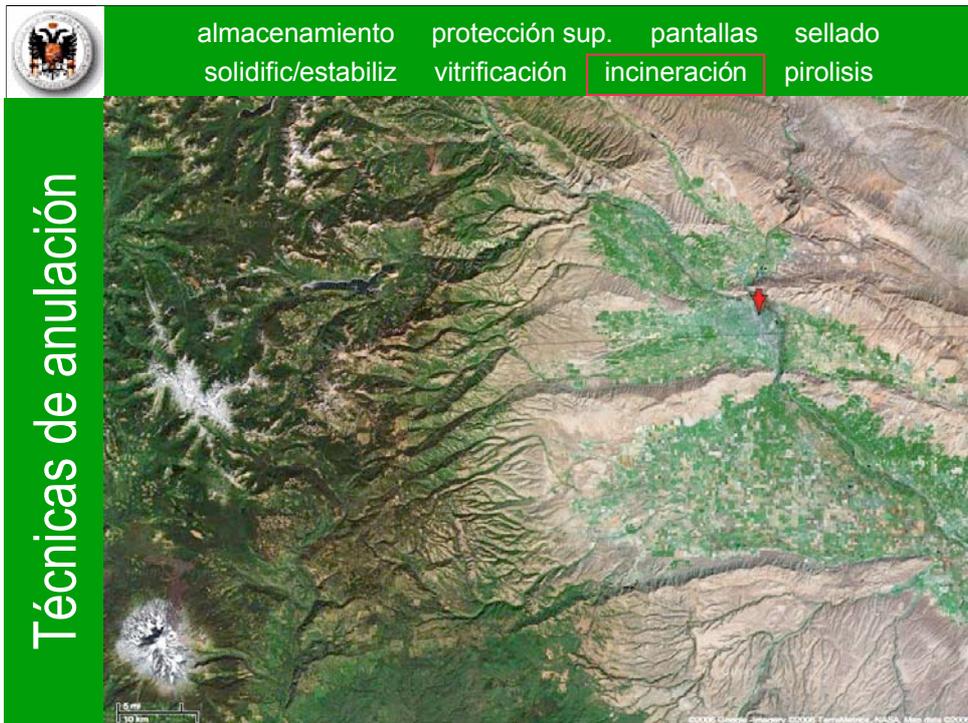
Técnicas de anulación

□ Caso práctico 2

1. Identificación

Localización. Washington





Yakima City, en unos valles fértiles a la caída de unos macizos montañosos, en el Estado de Washington



Yakima City, zona de gran actividad industrial, junto al río Yakima, pero fuera de su llanura de inundación.



La contaminación procede de la FMC Corporation, en unos terrenos abandonados por la Union Pacific Railroad, de 1/2 hectárea de extensión.

Los terrenos son arenosos y existe una capa de agua subterránea superficial que fluctúa con las precipitaciones y se desplaza hacia el próximo río Yakima.

No hay pozos de extracción de agua en las inmediaciones (en 2 km a la redonda).

Zona principalmente industrial pero también residencial.



Situación exacta



La FCM Co. es un fábrica de pesticidas (polvos y líquidos) que operó desde 1951 hasta su cierre en 1986.

Entre 1952 y 1969 los residuos contaminados con una amplia variedad de pesticidas fueron dispuestos en un vertedero en la parcela de la fábrica y simplemente se recubrieron con una capa de derrubios. Se calcula que representaron casi una tonelada de disolventes, emulsionantes y estabilizadores que contaminaron el suelo de los alrededores así como a los edificios de la industria.



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

Técnicas de anulación

Caso práctico 2

2. Historial de la contaminación

Origen

Fase previa

1983. Inclusión en el Listado Nacional de Prioridades

1987. EPA dicta un RI/FS para el sitio

1990. Record of Decision.

 Incineración.

 Plan de actuación

 Eficacia y objetivos a cubrir

RI/FS = remedial investigation/feasibility study. Fase III Planificación.

La siguiente Fase IV Actuación = Record of Decision.

Las previas:

Fase I. Valoración preliminar (Preliminary site assessment).

Fase II. Investigación detallada (Initial site investigation)



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

Caso práctico 2

3. Plan de actuación

Análisis de la situación

Extensión de la contaminación. 0,5 ha

Concentraciones de los contaminantes.

	Conc. máx. mg/kg
DDD	76
DDE	28
DDT	210
Dieldrín	40
Endosulfan	7.000
Etión	180
Malatión	170.00
Paratión	3.300
Cadmio	6
Cromo (VI)	230
Zin	1.020



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

Caso práctico 2

3. Plan de actuación

Análisis de la situación

Extensión de la contaminación. 0,5 ha

Concentraciones de los contaminantes.

	Conc. máx. mg/kg	EPA* mg/kg
DDD	76	5,10
DDE	28	3,60
DDT	210	3,60
Dieldrín	40	0,08
Endosulfan	7.000	4,20
Etión	180	42,4
Malatión	170.00	1.695,00
Paratión	3.300	11,00
Cadmio	6	8,00
Cromo (VI)	230	1,00
Zin	1.020	500,00

* Valores establecidos por EPA para la limpieza de este sitio.



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

Técnicas de anulación

❑ Caso práctico 2

3. Plan de actuación

	Conc. máx. mg/kg	EPA* mg/kg	Superación**
DDD	76	5,10	14
DDE	28	3,60	7
DDT	210	3,60	57
Dieldrín	40	0,08	499
Endosulfan	7.000	4,20	1.666
Etión	180	42,4	3
Malatión	170.00	1.695,00	--
Paratión	3.300	11,00	299
Cadmio	6	8,00	--
Cromo (VI)	230	1,00	229
Zin	1.020	500,00	1

* Valores establecidos por EPA para la limpieza de este sitio.

**Superación = número de veces que se supera el nivel de limpieza EPA
(concentración máxima – nivel EPA) / nivel EPA

Estos son datos de los suelos, en el vertedero existen residuos con concentraciones muchísimo mas altas.

Cr⁶⁺ es muy móvil y muy tóxico

Cr³⁺ relativamente insoluble, con alto poder de adsorción y menos tóxico



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

Técnicas de anulación

Caso práctico 2

3. Plan de actuación

Análisis de la situación

Planteamientos previos

1987. Muestreo inicial. > 25.000 mg/kg de DDT en los residuos

1988/9. Actuación urgente. Excavación (2,5 m de prof) y traslado a vertedero controlado de 800 tn de suelo contaminado.

1992. Ensayo de incineración.

Máximo EPA 5,1 mg/kg de DDT



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

Metodología empleada

❑ Caso práctico 2

La restauración comienza en 1992. Siguiendo el ROD:

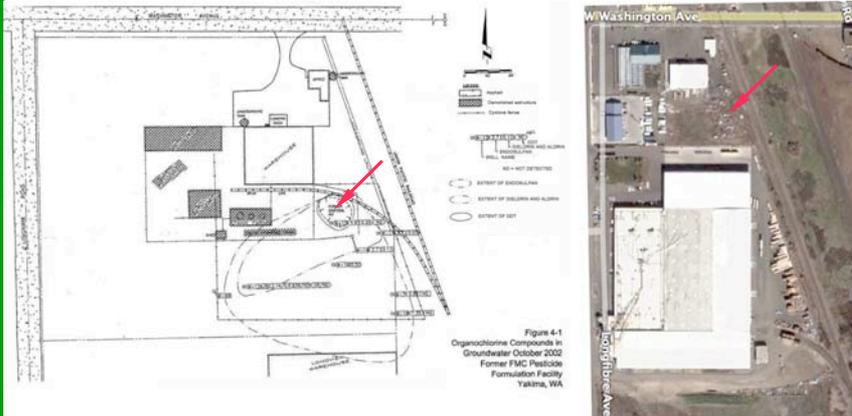
1. Muestreo de suelos y del hormigón de los muros de los edificios.
2. Los resultados muestran una importante contaminación que requiere tratamiento.
3. Excavación de los suelos que superaban los niveles prefijados para la limpieza.
4. Incineración on site de los suelos contaminados.
5. Desmantelación de los edificios y muros contaminados e incineración.



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

Técnicas de anulación

❑ Caso práctico 2



Localización del principal vertedero y contaminación circundante.
Edificios demolidos (señaladas con sombreado) y nuevas naves.
El círculo pequeño al norte del grande es l donde se localizaba el primitivo vertedero.
Warehouse = almacén



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

Técnicas de anulación

Descripción del sistema operativo

Caso práctico 2

Proceso on site

Pretratamiento

Suelos contaminados y hormigón triturado a < 25 cm.

Sólidos triturados y mezclados con el suelo.

Tratamiento

Equipo incinerador

Incinerador rotativo de 2 metros de diámetro y 7 m de largo.

Dotado de una cámara de combustión secundaria a 1.110°C.

Carga de suelo, 60 kg/min.

Temperatura, 650°C; capacidad calorífica, 10,5 millones BTU/hr

El incinerador se traslado al sitio distribuido en 6 grandes trailers y varios camiones.



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

Técnicas de anulación

Metodología empleada

❑ Caso práctico 2

La restauración comienza en 1992. Siguiendo el ROD:

1. Muestreo de suelos y del hormigón de los muros de los edificios.
2. Los resultados muestran una importante contaminación que requiere tratamiento.
3. Excavación de los suelos que superaban los niveles prefijados para la limpieza.
4. Incineración on site de los suelos contaminados.
5. Desmantelación de los edificios y muros contaminados e incineración.
6. Análisis de las cenizas del incinerador para comprobación de la efectividad de la destrucción de los contaminantes y determinación del grado de estabilidad (test TCLP de los lixiviados) antes de almacenarlas en un vertedero.
7. Vigilancia del agua subterránea durante cinco años.



almacenamiento
solidific/estabiliz

protección sup.
vitrificación

pantallas
incineración

sellado
pirolisis

Técnicas de anulación

3. Plan de actuación

Objetivos

Case Study 2
Health - Based cleanup levels for contaminated

Compound	soil (mg/kg)	concrete and surfaces ugs/100cm ²
DDD	5.1	6.5
DDE	3.6	4.6
DDT	3.6	4.6
Dieldrin	0.076	0.1
Cadmium	8.0	
Chromium vi	1.0	
Endosulfans	4.2	1 0.0
Ethion	42.4	270.0
Malathion	1695.0	8,200.0
Ethyl Parathion	11.0	2,400.0
DNOC	8.5	
Zinc	500.0	

suelos **edificaciones**

Compuestos muy tóxicos.

Cadmio, cromo VI, DDD, DDE, DDT y dieldrín son cancerígenos.

DNOC (4,6-dinitroo-cresol)



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

Técnicas de anulación

Caso práctico 2

3. Plan de actuación

Objetivos En las cenizas residuales

TCLP

Constituent	Regulatory Threshold Concentration (mg/L)
Metals	
Arsenic	5
Barium	100
Cadmium	1
Chromium	5
Lead	5
Mercury	0.2
Selenium	1
Silver	5
Organochlorine Pesticides	
Chlordane	0.03
Endrin	0.02
Heptachlor (and epoxide)	0.008
Lindane	0.4
Methoxychlor	10
Toxaphene	0.5



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

Técnicas de anulación

❑ Caso práctico 2

4. Resultados

Situación final Concentraciones máximas en las cenizas

TCLP

Constituent	Regulatory Threshold Concentration (mg/L)	FMC Yakima Ash TCLP Concentration (mg/L)
Metals		
Arsenic	5	0.016
Barium	100	0.19
Cadmium	1	0.0028
Chromium	5	0.011
Lead	5	0.020
Mercury	0.2	0.00012
Selenium	1	0.0099
Silver	5	0.0046
Organochlorine Pesticides		
Chlordane	0.03	0.00037
Endrin	0.02	0.000082
Heptachlor (and epoxide)	0.008	0.00018
Lindane	0.4	0.000037
Methoxychlor	10	0.00011
Toxaphene	0.5	0.0012

Los datos analíticos de las cenizas indican que los objetivos de la limpieza se han alcanzado plenamente.



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

Técnicas de anulación

Post-tratamiento de los gases en tres etapas.

- ⦿ **Primera etapa.** Un acondicionador de gases (Quench system).

Los gases de reacción ácida fueron neutralizados por medio de un reactivo de pH controlado inyectado como spray.

- ⦿ **Segunda etapa.** Después inyección de los gases a través de una capa de agua y reciclado del agua en un depurador de efecto venturi, con un relleno de pequeñas bolitas y un sistema de enfriamiento rápido, para eliminar los gases.

- ⦿ **Tercera etapa.** Consta de un depurador de efecto venturi dotado de un sistema de alto voltaje que ioniza las partículas las cuales se cargan electrostáticamente y pueden ser atrapadas en el depurador aunque sean de muy pequeño tamaño. Finalmente se realiza un filtrado con carbón activo que retiene partículas menores de 1 micra.

- Post-tratamiento de cenizas.** Se recogieron y se analizaron con por el test TCLP. Al dar resultados adecuados se procedió a su almacenamiento on site.

- Post-tratamiento del agua:** Tanques agitación y filtros de carbón activo.

El tratamiento de los gases que se producen en el incinerador representan una etapa crucial.



almacenamiento
solidific/estabiliz

protección sup.
vitrificación

pantallas
incineración

sellado
pirolisis

Caso práctico 2

4. Resultados

Cantidad de material tratado.

4.300 m³ de suelos y residuos (7.110 tn).

Periodo del tratamiento.

Cinco meses: enero a mayo de 1993.

Costos.

6.000.000 \$. Con un coste unitario de 844 \$/tn.



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

Técnicas de anulación

❑ Caso práctico 3

1. Identificación

Localización. Washington





almacenamiento
solidific/estabiliz

protección sup.
vitrificación

pantallas
incineración

sellado
pirolisis

❑ **Caso práctico 3**

1. Identificación

Localización. Coal Creek, Chehalis, Washington. USA.

Técnica. Incineración on site.

Contaminantes. Aceites conteniendo PCB (bifenilos policlorados) y metales pesados, especialmente plomo pero también Cu, Ba, Hg, Cd y Zn.



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

Técnicas de anulación

☐ **Caso práctico 3**

2. Historial de la contaminación

Origen



Coal Creek está situada a aproximadamente a dos km de Chehalis, Washington. USA.

Es una zona residencial con factorías para la producción de componentes eléctricos, reparaciones eléctricas y desguaces de equipamientos que operan desde 1.900.

Durante este tiempo se han acumulado residuos que han contaminado a los suelos y a las aguas con aceites conteniendo PCBs (bifenilos policlorados) y también metales pesados y otros contaminantes.

El origen de la contaminación son unos montículos de residuos que son atravesados por las aguas de escorrentía superficiales, también por migración de partículas de polvo y por emisión de gases.

En una primera revisión se encontraron 88 compañías con responsabilidad directa sobre los vertidos acumulados, la mayoría de ellas se dedicaban a la fabricación de componentes eléctricos y utilizaban la zona como vertedero de sus desechos.



En ese claro, en la parte norte, se encontraba el montículo que se elevaba hasta dos metros y medio sobre la superficie del terreno y llegó a ocupar un cuarto del área. Para el acceso de los camiones se recubrió con grava y arena formando un rampa.



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

Técnicas de anulación

❑ Caso práctico 3

2. Historial de la contaminación

Fase previa

1983. Primeros análisis > 21.000 mg/kg de PCB

1984. Medidas de urgencia.

- Cubierta de la superficie del montículo principal con un tejido plástico y perforación de pozos para análisis.
- Corrección de las acequias.
- Aislamiento de la parcela con una cerca.

1989. Plan de viabilidad. Definición de riesgos.

- Protección para las personas.
- Prevención difusión de la contaminación por aire y agua (superficiales y subterráneas).

PCB, bifenilos policlorados

Recubierta con tejido plástico para evitar infiltraciones por las lluvias y arrastres por el viento.

Plan de viabilidad, Remedial Investigation/Feasibility Study (RI/FS)



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

Técnicas de anulación

❑ Caso práctico 3

3. Plan de actuación

Análisis de la situación

Extensión de la contaminación. 8 ha, aproximadamente.

Concentraciones de los contaminantes.

Contaminantes	Concentración* mg/kg
PCB	21.000
Cu	31.000
Zn	5.300
Pb	3.800
Ba	1.200
Hg	20
Cd	9

* Concentración máxima encontrada en los suelos del sitio investigado.

PCBs, bifenilos policlorados. Son SVOCs halogenados



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

Técnicas de anulación

❑ Caso práctico 3

3. Plan de actuación

Análisis de la situación

Extensión de la contaminación. 8 ha, aproximadamente.

Concentraciones de los contaminantes.

Contaminantes	Concentración* mg/kg	NGR** mg/kg
PCB	21.000	0,1
Cu	31.000	100
Zn	5.300	200
Pb	3.800	200
Ba	1.200	¿?
Hg	20	3
Cd	9	3

* Concentración máxima encontrada en los suelos del sitio investigado.

** Nivel Genérico de referencia calculado según datos de la Junta de Andalucía

Se toman los Niveles Genéricos de Referencia para Parques y espacios libres de la Junta de Andalucía

Nivel Genérico de Referencia de los PCBs en BOE 18 Enero 2005: uso industrial 0,8 mg/kg; uso urbano/residencial 0,08 mg/kg; sin restricciones de uso 0,01 mg/kg.



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

Técnicas de anulación

❑ Caso práctico 3

3. Plan de actuación

Análisis de la situación

Extensión de la contaminación. 8 ha, aproximadamente.

Concentraciones de los contaminantes.

Contaminantes	Concentración* mg/kg	NGR** mg/kg	Superación***
PCB	21.000	0,1	210.000
Cu	31.000	100	309
Zn	5.300	200	26
Pb	3.800	200	18
Ba	1.200	¿?	¿?
Hg	20	3	6
Cd	9	3	2

* Concentración máxima encontrada en los suelos del sitio investigado.

** Nivel Genérico de referencia calculado según datos de la Junta de Andalucía

*** superación = número de veces que se supera el nivel de referencia
(concentración máxima – nivel de referencia) / nivel de referencia

Los niveles de intervención serían unas cinco veces los de referencia.



almacenamiento
solidific/estabiliz

protección sup.
vitrificación

pantallas
incineración

sellado
pirolisis

❑ **Caso práctico 3**

3. Plan de actuación

Análisis de la situación

Extensión de la contaminación. 8 ha

Concentraciones de los contaminantes.

Características de los suelos. Sin datos

Hidrología. No existen en la zona captaciones de agua para consumo humano



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

❑ **Caso práctico 3**

3. Plan de actuación

Análisis de la situación

Planteamientos previos

1990. Plan de actuación. (Record of Decision, ROD).

Procedimiento y pasos a seguir.

1. Demolición de los edificios y retirada de asbestos
2. Análisis de los suelos y separación en dos grupos
 - >50 mg/kg PCBs
 - >1 y <50 mg/kg PCBs



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

Técnicas de anulación

1990. Plan de actuación. (Record of Decision, ROD).

1. Demolición de los edificios y retirada de asbestos
2. Análisis de los suelos y separación en dos grupos
>50 mg/kg PCBs y otro para >1 y <50 mg/kg PCBs.
3. Incineración on site de suelos >50 mg/kg PCBs
4. Almacenamiento de las cenizas del incinerador y de suelos con
5. 1-50 mg/kg PCBs en vertedero on site.
6. Recubierta del vertedero.
7. Establecimiento de una red de drenaje en el perímetro para control de las aguas de escorrentía superficial.
8. Profundas restricciones para el uso del agua subterránea.
9. Vigilancia del agua subterránea a los cinco años.
10. El ROD requiere una eficacia de la destrucción del 99,9999% después de la incineración.



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

Técnicas de anulación

Puesta en práctica del plan de actuación

❑ Equipo incinerador

- ⊙ Con cámara de combustión secundaria y un sistema de control de gases.
- ⊙ Horno rotatorio
 - Tamaño de 2 m de diámetro por 8 m de largo.
 - Velocidad 1,2 rpm.
 - Tiempo de residencia 30 minutos.
 - Rendimiento 9.000 kg/hr.
 - Temperatura del horno 1.000°C.
 - Capacidad calorífica 33 millones de BTU/hr.
- ⊙ Cámara de combustión secundaria para los gases pretratados;
 - 1.100° durante 2 segundos.
 - El gas fue enfriado a 230°
 - Enfriamiento rápido con spray de agua antes de pasar a la unidad de depuración.
- ⊙ El sistema controlador de los gases consta de:
 - depurador multifiltro para las partículas
 - depurador de efecto venturi para los gases.

*BTU = *British Thermal Unit*. Una BTU representa la cantidad de energía que se requiere para elevar a un grado Fahrenheit la temperatura de una libra de agua en condiciones atmosféricas normales. Una BTU equivale aproximadamente: a 252,2 calorías y a 1055 julios



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

Técnicas de anulación

Puesta en práctica del plan de actuación

Equipo post-incinerador

- ⊙ El agua fue tratada con un sistema de filtros de carbón.
- ⊙ El suelo y las cenizas y con concentraciones entre 1 y 50 mg/kg PCBs , y 500 mg/kg de Pb, fueron acumulados en un vertedero on site de 16.800 m³, sin tratamientos previos.
- ⊙ Las cenizas conteniendo más de 500 mg/kg de Pb fueron estabilizadas con cemento y acumuladas on site.
- ⊙ 8.550 m² de una resina sintética se utilizaron para recubrir el vertedero con un sistema multicapa (PVC, geonet, geotextil), arcillas compactadas, suelo limpio y vegetación herbácea.
- ⊙ Los restos conteniendo más de 50 mg/kg de PCBs fueron enviados a un vertedero de máxima seguridad (Envirosafe en Idaho).
- ⊙ Los restos conteniendo menos de 50 mg/kg de PCBs fueron acumulados on site.
- ⊙ El incinerador fue desmontado y retirado al final del proceso



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

Técnicas de anulación

Caso práctico 3

3. Plan de actuación

Análisis de la situación

Planteamientos previos

Metodología empleada

Objetivos

Total bifenilos polyclorurados (PCBs)..... 1 mg/kg
Total tetraclorodibenzo(p)dioxina (TCDD)..... 1 µg/kg



almacenamiento
solidific/estabiliz

protección sup.
vitrificación

pantallas
incineración

sellado
pirolisis

❑ **Caso práctico 3**

4. Resultados

Situación final. El test TCLP dio resultados satisfactorios.
El ROD a 99.9999% DRE

Cantidad de material tratado. 8.813 tn de suelos.

Periodo del tratamiento. Cinco meses: de enero a mayo de 1994.

Costos. 10.000.000 \$. Con un coste unitario de 1.134 \$/tn.



almacenamientoprotección sup.pantallassellado

solidific/estabilizvitrificaciónincineraciónpirolisis

Técnicas de anulación

Pirolisis

- Descripción**

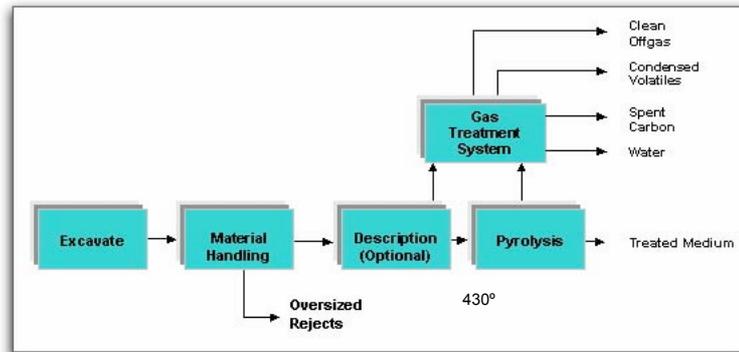
- Localización.** Ex situ.

Pirolisis como la incineración pero en ausencia de oxígeno (así se evita la oxidación de los materiales); aunque siempre hay algo de oxígeno y una pequeña oxidación siempre esta presente.



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

Técnicas de anulación



www.ftrr.gov/matrix2/section4/D01-4-25.html

Pirólisis usa temperaturas mucho más bajas que la incineración. Típicamente a 430°C y trabaja bajo presión.

Los materiales orgánicos se transforman en CO₂, H₂O, metano y otros hidrocarburos; también se produce pequeñas cantidades de líquidos y un residuo sólido conteniendo carbón y cenizas.

Los gases se tratan en un proceso secundario en una unidad de oxidación térmica.

En este proceso el suelo es tratado en un baño a baja temperatura, sin presencia de llama directa para evitar posibles transformaciones de los materiales a compuestos tóxicos como ocurre típicamente en la incineración. Se utiliza una corriente de un gas. Frecuentemente la pirólisis se desarrolla en presencia de sal fundida. Las sales al fundir reaccionan con los contaminantes y los degradan y atrapan partículas y gases. Además, las sales al ser alcalinas neutralizan a los ácidos de los gases. Finalmente las sales deben ser depuradas antes de acumularlas en un vertedero.



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

Técnicas de anulación

Aplicaciones y ventajas

- ⊙ VOCs, SVOCs, PCBs, PAHs, carbur. y pesticidas.
- ⊙ Productos finales de reducido volumen.
- ⊙ Procedimiento apenas utilizado hasta ahora.

Limitaciones e inconvenientes

- ⊙ Destrucción total del suelo.
- ⊙ La incompleta combustión puede producir compuestos extremadamente tóxicos (dioxinas y furanos).
- ⊙ Procedimiento no válido para contaminantes inorgánicos.
- ⊙ Residuo que debe ser posteriormente estabilizado.

Tiempo Procedimiento muy rápido.

Costes De moderados costes. 330 \$/tn.



almacenamiento
solidific/estabiliz

protección sup.
vitrificación

pantallas
incineración

sellado
pirolisis

Técnicas de anulación

Comparativa final



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

Técnicas de anulación

Rendimientos de estas técnicas en diversos proyectos realizados

Técnicas de aislamiento

Técnica	Niveles iniciales máximos (mg/kg)	Número de veces que se supera el nivel genérico de referencia	Duración del tratam. (meses)	Suelo tratado	Coste unitario	Localidad (USA)
Recubrimiento	todo tipo orgánicos e inorgánicos, radioisótopos residuos biomédicos: cadáveres, sangre, heces		3	10.000 m ³		Lawrence Livermore National Laboratory, California
Encapsulado	Pb 68.300 resid Pb 39.000 suelos	Pb 135 Pb 77	12	64.000 m ³ resid 87.000 m ³ suelos >1.000 mg/kg Pb; 25.500 m ³ suelos >10.000 mg/kg de Pb		Tonolli Corp., Carbon County, Pensilvania
Estabilización / solidificación	Pb 12.200 Cu 191 Ni 78 Sb 60	Pb 23 Cu 0 Ni 0 Sb ¿?	6	80.000 m ³	197 \$/m ³	Massachusetts Military Reservation, Cape Cod,



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

Técnicas de anulación

Rendimientos de estas técnicas en diversos proyectos realizados
 Técnicas de destrucción

Técnica	Niveles iniciales máximos (mg/kg)	Número de veces que se supera el nivel genérico de referencia	Niveles finales máximos (mg/kg)	Duración del tratam. (meses)	Suelo tratado	Coste unitario	Localidad (USA)
Vitrificación	Lindano 78 Clordano 89 DDD 48 DDE 37 DDT 340 Dieldrin 87 Hexacloroben 2,6 Hg 34 Dioxina 0,0011	Lindano 370 Clordano 8.899 DDD 68 DDE 61 DDT 1.699 Dieldrin 8.699 Hexacloroben 12 Hg 2 Dioxina 549	¿? Clordano 0,08 ¿? ¿? DDT 0,016 Dieldrin 0,016 ¿? Hg 0,11 ¿?	12	2.300 m ³	768 \$/m ³	Parsons Chemical/ETM Enterprises, Grand Ledge, Michigan (USA).



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

Técnicas de anulación

Técnicas de destrucción, rendimientos en proyectos realizados

Incineración

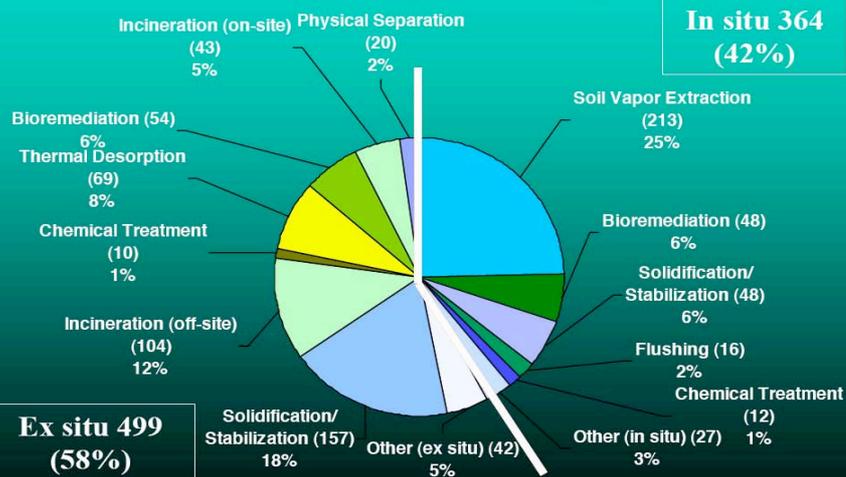
Niveles iniciales máximos (mg/kg)	Número de veces que se supera el nivel genérico de referencia	Niveles finales máximos (mg/kg)	Duración del tratam. (meses)	Suelo tratado	Coste unitario	Localidad (USA)
Naftaleno 58 Clorobenceno 2,3 Tolueno 5 Dicloroetano 20 Cloruro metile 1	Naftaleno 57 Clorobenceno 1 Tolueno <1 Dicloroetano 399 Cloruro metile 99		18	75.000 m ³ 450.000 tn	230 \$/tn	Sikes Disposal Pits, Crosby, Houston, Texas
DDD 76 DDE 28 DDT 210 Dieldrin 40 Endosulfan 7.000 Etión 180 Malatión 170 Paratión 3.300 Cadmio 6 Cromo (vi) 230 Zn 1.020	DDD 14 DDE 7 DDT 57 Dieldrin 499 Endosulfan 1.666 Etión 3 Malatión ¿? Palatión 299 Cd ¿? Cr (vi) 229 Zn 1	DDD 5,1 DDE 3,6 DDT 3,6 Dieldrin 0,076 Endosulfan 4,2 Etión 42,4 Malatión 1695 ¿? Cd 9 ¿? Zn 5.300	5	5.000 m ³	844 \$/tn	FMC Corporation - Yakima Pit, Washington
PCB 21.000 Cu 31.000 Zn 5.300 Pb 3.800 Ba 1.200 Hg 20 Cd 9	PCB 210.000 Cu 309 Zn 26 Pb 18 Ba ¿? Hg 6 Cd 2		5	8.813 tn	1.134 \$/tn	Coal Creek, Chehalis, Washington.



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

Técnicas de anulación

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



15

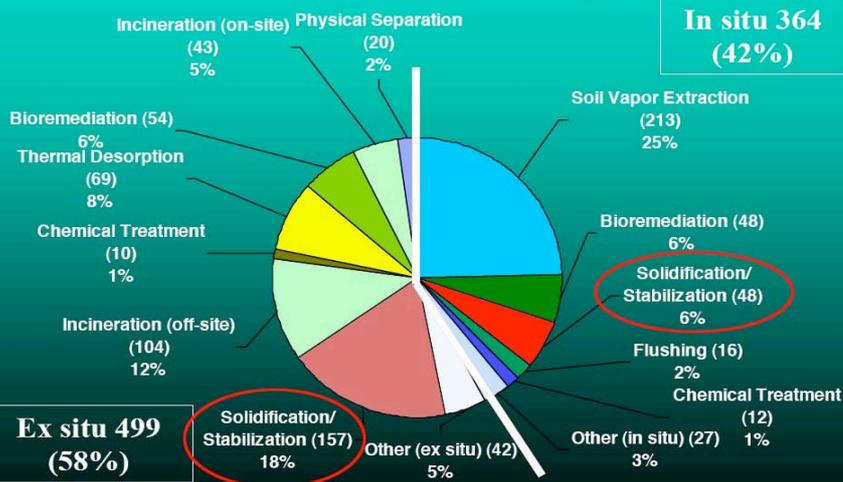
5/13/05



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

Técnicas de anulación

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

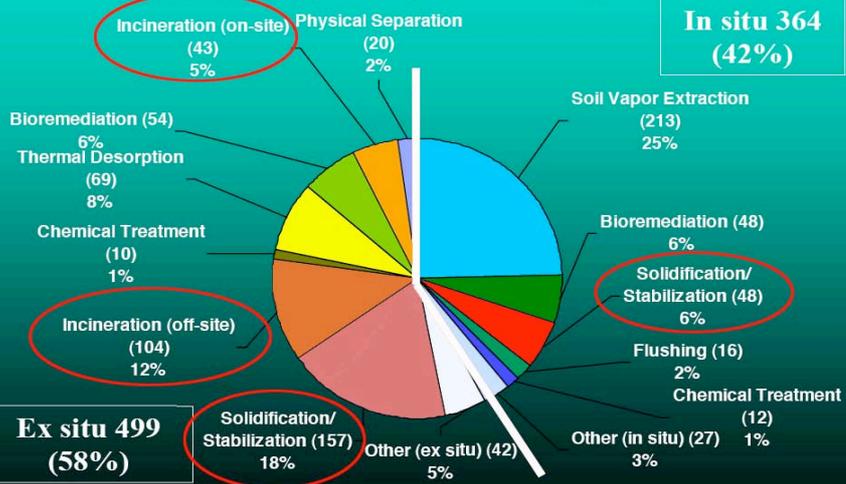




almacenamiento protección sup. pantallas sellado
solidific/estabiliz vitrificación incineración pirolisis

Técnicas de anulación

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



15

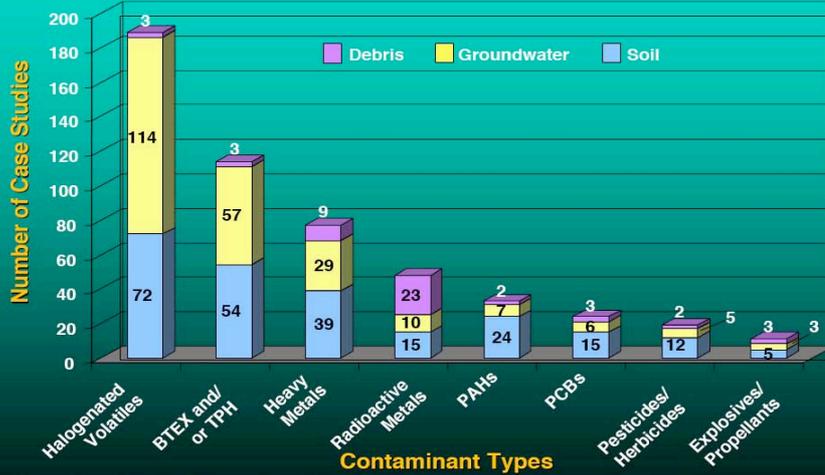
5/13/05



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

Técnicas de anulación

FRTR Cost and Performance Case Studies* Contaminants and Media Treated



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

19

5/13/05



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

Técnicas de anulación

Cuadro comparativo de las prestaciones de las principales técnicas de anulación

Rating Codes
 ■ Better; ○ Average; ▲ Worse; ◆ ?

V - Yes; N - No;
 F - Fair; P - Pilot;
 S - Solid; L - Liquid; V - Vapor;
 NA - Not Applicable

	Development Status	Treatment Train (excludes off-gas treatment)	Residuals Produced	Availability	System Reliability/ Maintainability	Cleanup Time	Overall Cost	Nonhalogenated VOCs	Halogenated VOCs	Nonhalogenated SVOCs	Halogenated SVOCs	Fuels	Inorganics	Radionuclides	Explosives
Excavation, Retrieval, and Off-Site Disposal	F	N	NA	■	■	■	◆	○	○	○	○	○	○	○	○
Landfill Cap	F	N	L V	■	■	■	■	○	○	○	○	○	○	○	○
Solidification/Stabilization	F	N	S	■	■	■	■	▲	▲	○	○	▲	■	■	▲
Vitrification	F	N	S	■	■	■	■	○	○	○	○	▲	■	■	▲
Incineration	F	N	L S V	■	○	■	■	■	■	■	■	■	▲	▲	■
Pirolisis	F	N	L S V	■	▲	■	■	○	○	■	■	○	▲	▲	▲

En las tres primeras técnicas (Excavación, Landfill y Solidification/Stabilization) los contaminantes quedan inmobilizados mientras que en las tres restantes (Vitrificación, Incineración y Pirolisis) los contaminantes quedan destruidos.

La incineración es la técnica más efectiva obteniendo los mejores resultados para varios tipos de contaminantes, siendo la técnica ideal para altas concentraciones de VOCs y SVOCs (halogenados y no halogenados) y fuels.

La solidificación/estabilización y la vitrificación son las técnicas idóneas para el tratamiento de suelos contaminados con productos inorgánicos (como los metales pesados) y los isótopos radioactivos.

Ninguna de estas técnicas extrae los contaminantes para separarlos del suelo y así limpiarlo. En todos los casos el suelo queda anulado para cualquier posible uso posterior.

- VOC no halogenados: BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno), acetona, butanol, etanol, metanol, meti 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) ...
- Radioisótopos: uranio 234, 235 y 238; radio 224 y 226; cesio 134 y 137; carbono 14; bario 149; kriptó 85; Plutonio 238, 239 y 241; Torio 228, 230 y 230; tritio; ...
- Explosivos: TNT (2,4,6-Trinitolueno), nitroglicerina, nitrocelulosa, TNB (trinitobenceno)

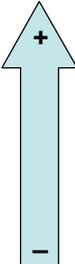
almacenamiento protección sup. pantallas sellado
solidific/estabiliz vitrificación incineración pirolisis

Técnicas de anulación

Resumen de las técnicas de anulación

Técnicas más utilizadas

- Incineración
- Estabilización/Solidificación
- Almacenamiento en vertederos
- Vitrificación
- Protección superficial





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

Técnicas de anulación

- 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: dclorobenceno, 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)