



Descontaminación de suelos

Master en Ingeniería del Medio Ambiente Módulo Suelos

Carlos Dorronsoro Fernández
Dpto Edafología y Química Agrícola
Facultad de Ciencias. Universidad de Granada

efdorr@ugr.es

<http://edafologia.ugr.es/>

<http://www.edafologia.net>



Descontaminación de suelos

Programa general

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

En cada una de las técnicas se mostrarán una serie de casos prácticos.



Técnicas físicas y químicas de descontaminación del suelo

Programa general

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



Casos prácticos





Situación inicial

Localización. Sand Creek. Denver, Colorado, (USA).

Caso práctico 2. Sand Creek



LOCALIZACIÓN. Sand Creek se encuentra localizado a 8 km al noreste de Denver en Colorado (USA).



Sand Creek es un área de gran actividad industrial. Incluye empresas de camiones, industrias relacionadas con el refinado del petróleo, industrias químicas, compañías de abastecimiento, almacenes y pequeños negocios.

En Sand Creek existen cuatro focos principales de contaminación (todos hoy día inactivos):

La **COLORADO ORGANIC CHEMICAL COMPANY (COC)** property. Representa la causa principal de la contaminación en la zona. Manufactura pesticidas desde comienzos de los 1960 hasta 1984. Sufrió un importante incendio en 1968, que destruye las instalaciones liberándose importantes cantidades de gases tóxicos procedentes de los depósitos de los pesticidas almacenados, fundamentalmente paratión.

Tras el incendio el Departamento de Salud del distrito realiza una inspección, encontrando altos niveles de VOC en los suelos, tales como pesticidas organofosfatados y otros pesticidas técnicamente transformados y en 1978 declara el estado de emergencia para el área ocupada por la Colorado Organic Chemical Company y las áreas adyacentes afectadas por el fuego. En 1984 la EPA declara la limpieza del sitio de interés nacional preferente (dentro del programa CERCLA o, es decir SUPERFUND). En 1989 se dicta el correspondiente ROD (Record of Decision) y se procede a la limpieza. La zona queda sujeta a una revisión periódica cada cinco años durante 30 años.

La **L-C CORPORATION (LCC) PROPERTY** ha desarrollado actividades industriales desde 1948. En 1968 la contrata la Shell Chemical Company para que se encargue del almacenamiento y neutralización de residuos ácidos derivados de herbicidas químicos caducados procedentes de la planta que la Shell tiene en Rocky Mountain Arsenal. En 1974 invaden la finca ganado errante que resulta con graves quemaduras químicas por contacto con charcas ácidas, alertando de la peligrosidad del sitio a las autoridades locales.

La **ORIENTAL REFINERY PROPERTY** sufrió un fuego en 1955 y como consecuencia se produjo un derrame de productos de la refinería del petróleo de aproximadamente 182.000 litros.

EI 48TH AND HOLLY LANDFILL. Se trata de un vertedero que recibe residuos entre 1968 y 1975, fundamentalmente procedentes de derribos y de residuos domésticos. En 1977 se producen dos explosiones del gas metano acumulado que mata a dos personas e hiere a cinco más. Como consecuencia de este accidente el Colorado Department of Public Health and the Environment (CDPHE) y otras agencias locales realizan un intenso estudio de la situación del vertedero. En 1980 es transferida toda la información a la agencia nacional EPA que dada la peligrosidad de la zona (gas emanado del vertedero, pesticidas, residuos de refinerías, etc) la cataloga inmediatamente como un sitio Superfund y es finalmente incluida en National Priorities List (NPL) en 1983.

EI informe REMEDIAL INVESTIGATION (RI)/SITE CHARACTERIZATION REPORT se desarrolla en 1987. En dicho estudio se realiza un muestreo preliminar y los análisis de suelos y aguas subterráneas ponen de manifiesto la existencia de más de 75 contaminantes. De ellos más de 20 fueron catalogados como peligrosos, fundamentalmente VOCs, pesticidas y metales pesados.



RECORD OF DECISION

Objetivos

- Protección de la salud humana y del medio ambiente
- Restaurar el sitio para un uso industrial

Metas

- Reducir riesgos frente a la ingestión e inhalación de partículas de suelo a los trabajadores
- Asegurar la salud de los niños al pasear y jugar dentro de la zona
- Controlar la emanación de gases del vertedero
- Reducir la contaminación del suelo y de las aguas subterráneas, y concretamente estas frente a un potencial uso

En 1989 se elabora el correspondiente Record of Decision con los siguientes objetivos ...



Caso práctico 2. Sand Creek

Table 3: Contaminants of Concern and Selected Remedies for Sand Creek OUs

OU	Contaminant(s) of Concern	Selected Remedy
1a	Pesticides above 1,000 ppm	Excavation/Incineration
1b	Volatile Organic Compounds	Excavation and Soil Vapor Extraction
1c	Pesticides/Herbicides/Metals	Excavation and Low Temperature Thermal Treatment
2	Volatile Organic Compounds	DVE, Institutional Controls and Monitoring
	Pesticides/Herbicides/Metals	Institutional Controls and Monitoring
3	Volatile Organic Comp/Metals	Capping, Institutional Controls, and Monitoring
	Methane Gas	Landfill Gas Extraction System

Dada la complejidad del sitio, para las labores de rehabilitación de la zona se establecen tres unidades operativas (OUs)

La OU1 con tratamiento de suelos, que se subdivide en tres subunidades

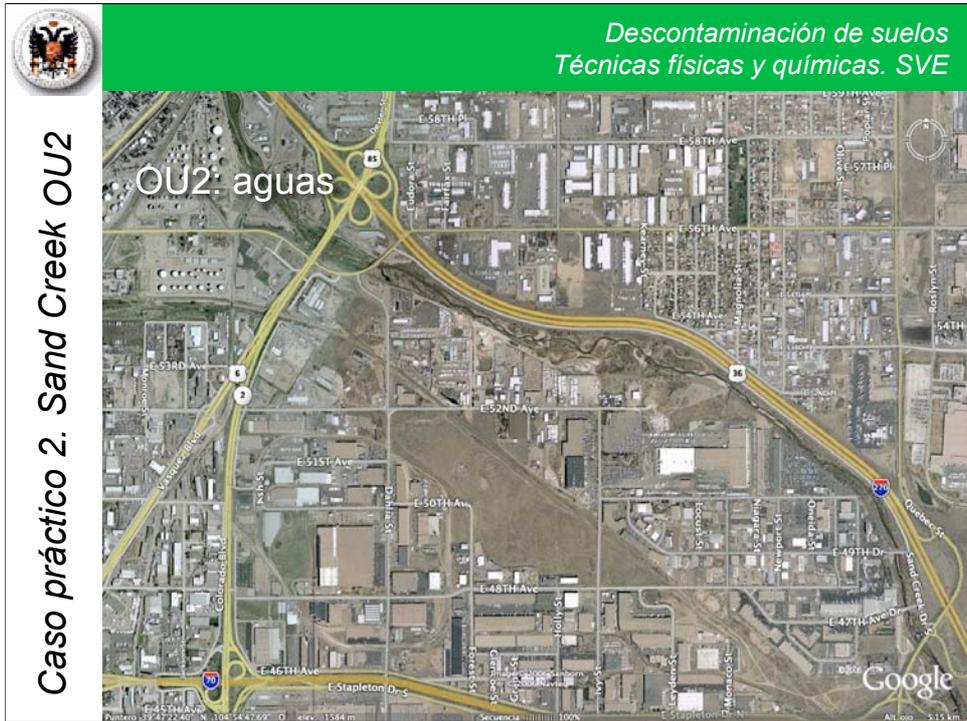
La OU2 con tratamiento de aguas subterráneas

Y la OU3 reservada para la remediación del vertedero (con tratamientos para los suelos y las aguas)

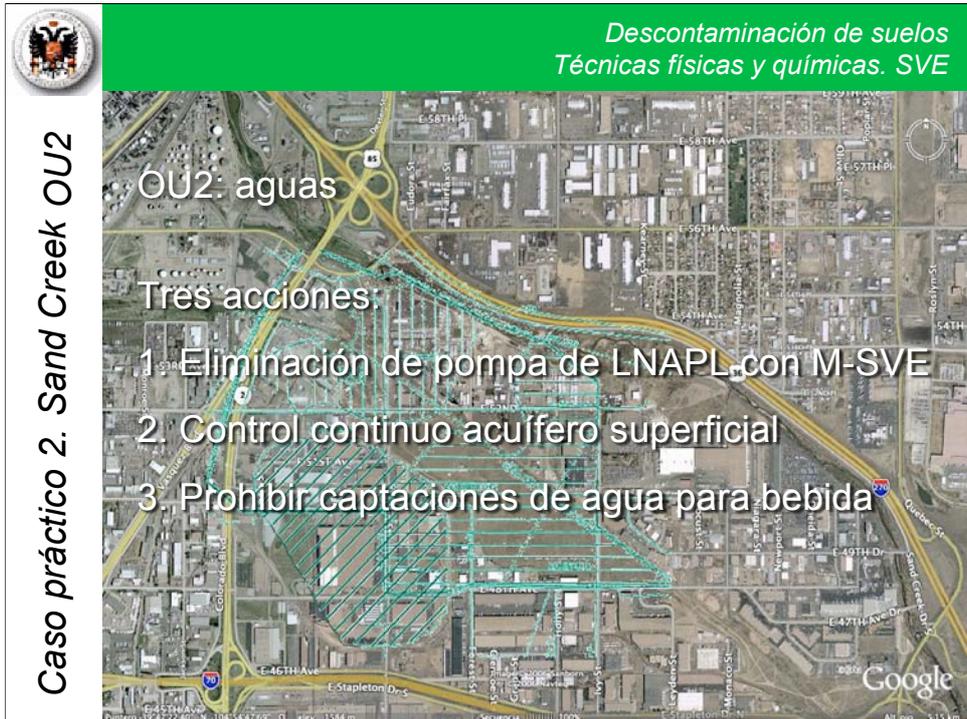


Las tres unidades operativas definidas, corresponden:

- OU1. Colorado Organic Chemical Company (COC), Oriental Refinery Property and L-C Corporation (LCC): Contaminated Buildings and Deep Soils, Surface and Shallow Soils
- OU2. Groundwater: Site-Wide
- OU3. Landfill. 48th and Holly Landfill: Soils, Groundwater, Surface Water and Methane Gas.



La OU2 ocupa una amplia zona en la parte central, con varios acuíferos contaminados



Unidad Operativa 2 (OU2). Aguas subterráneas.

Acuífero 0, rayado a 45°; acuífero 1, rayado vertical y acuífero 2 rayado vertical.

Se planifican tres acciones de remediación ...

El equipo utilizado para la M-SVE fue fundamentalmente el mismo que se usó en la unidad OU1 para el tratamiento SVE de los suelos.



Unidad Operativa 3 (OUs 3). Vertedero
REMEDY SELECTION (1990) AND REMEDY IMPLEMENTATION (1991)
Extracción y tratamiento del gas metano usando el sistema Landfill Gas-
Extraction System (LFGES)



*Descontaminación de suelos
Técnicas físicas y químicas. SVE*

Caso práctico 2. Sand Creek OU3

OU3: vertedero

Intervención en cinco acciones:

1. Extracción y tratamiento del gas metano
2. Restaurar la cobertera de suelo y revegetar
3. Cercar la zona y rotular
4. Control del agua subterránea
5. Control del gas metano



Para controlar el gas metano se excavaron 28 pozos que se controlaron al menos con una periodicidad mensual. Para su extracción se instalaron 75 pozos conectados a un sistema de vacío.



Unidad Operativa 1 (OU1).

Colorado Organic Chemical Company. A la izquierda la refinería (camiones y trailer por todos lados) y arriba la L-C Corporation.

REMEDY SELECTION (1989) AND REMEDY IMPLEMENTATION (1995)



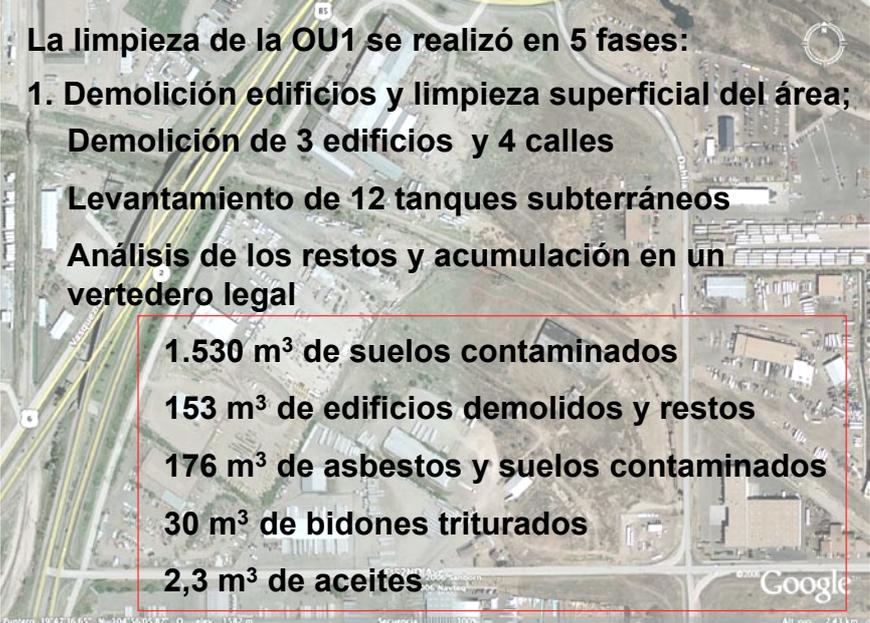
**Descontaminación de suelos
Técnicas físicas y químicas. SVE**

Caso práctico 2. Sand Creek OU1

La limpieza de la OU1 se realizó en 5 fases:

1. Demolición edificios y limpieza superficial del área;
Demolición de 3 edificios y 4 calles
Levantamiento de 12 tanques subterráneos
Análisis de los restos y acumulación en un vertedero legal

1.530 m³ de suelos contaminados
153 m³ de edificios demolidos y restos
176 m³ de asbestos y suelos contaminados
30 m³ de bidones triturados
2,3 m³ de aceites



Puntero: 19°47'36.65" N, 104°50'05.87" O, elev: 1582 m. Secuencia: 100%. Alt. ojo: 243 km. Google

Unidad Operativa 1 (OU1). Colorado Organic Chemical Company.

Al terminar esta fase se aplanó la parcela y se sembró y se anularon por un tiempo las actividades industriales.

1500/15 = 100 camiones bañera de tamaño medio llenos

153 y 176 aprox 10 camiones cada uno



Caso práctico 2. Sand Creek OU1

La limpieza de la OU1 se realizó en 5 fases:

1. Demolición de edificios y limpieza superficial del área;
2. Excavación, incineración y almacenamiento de los suelos superficiales fuertemente contaminados (VOCs halogenados > 1.000 mg/kg)

8.345 kg de suelos incinerados



$$P = V \times D; \quad V = P/D = 8345 / 1,8 = 4.636 \text{ litros} = 4,6 \text{ m}^3$$

**Descontaminación de suelos
Técnicas físicas y químicas. SVE**

Caso práctico 2. Sand Creek OU1

La limpieza de la OU1 se realizó en 5 fases:

1. Demolición de edificios y limpieza superficial del área;
2. Excavación, incineración y almacenamiento de los suelos superficiales fuertemente contaminados (Comp Org Halog > 1.000 mg/kg)
3. Excavación y tratamiento térmico on site de los suelos superficiales (<1,5m) con <1.000 mg/kg de VOCs

29.000 m³ de suelos tratados

Google

Puntiero: 39°47'36.65" N, 104°50'51.87" O, elev: 1352 m
Secuencia: 100%
Alt. ojo: 243 km

Operable Unit 1 (OU1).

Low Temperature Thermal Treatment (LTTT) con depuración final de los gases por adsorción de carbón.

aprox. 2.000 camiones bañera



Caso práctico 2. Sand Creek OU1

*Descontaminación de suelos
Técnicas físicas y químicas. SVE*

La limpieza de la OU1 se realizó en 5 fases:

- 1. Demolición de edificios y limpieza superficial del área;**
- 2. Excavación, incineración y almacenamiento de los suelos superficiales fuertemente contaminados (Comp Org Halog > 1.000 mg/kg)**
- 3. Excavación y tratamiento térmico de los suelos superficiales ($< 1,5$ m) con < 1.000 mg/kg de COH**
- 4. Rellenado de las superficies excavadas con suelo limpio**



*Descontaminación de suelos
Técnicas físicas y químicas. SVE*

Caso práctico 2. Sand Creek OU1

La limpieza de la OU1 se realizó en 5 fases:

1. Demolición de edificios y limpieza superficial del área;
2. Excavación, incineración y almacenamiento de los suelos superficiales fuertemente contaminados (Comp Org Halog > 1.000 mg/kg)
3. Excavación y tratamiento térmico de los suelos superficiales (<1,5m) con <1.000 mg/kg de COH
4. Rellenado de las superficies excavadas con suelo limpio
5. Tratamiento SVE con oxidación catalítica para los suelos entre 1,5 y 6 m con VOCs.

6.520 m³ de suelos tratados
80 tn de VOCs fueron extraídos
98,8% de eficacia

Google

Puntero: 19°47'36.65" N, 104°50'51.87" O, elev. 1352 m. Seguridad: 100%. Alt. ojo: 243 km.

Unidad Operativa 1 (OU1).

Previamente a la eliminación de los VOCs por SVE la EPA dictó a Remedial Action Completion Report (RACR) para asegurar que todos aquellos suelos que estaban contaminados con pesticidas y arsénico fueran retirados (se tuvieron que excavar y retirar 3.800m³).



Caso práctico 2. Sand Creek OU1

El equipo de arrastre de vapores mediante vacío (SVE) colocado en Sand Creek consta de 31 pozos verticales y uno horizontal. En la imagen se representa la posición exacta de los pozos.



La Unidad Operativa 1 se subdividió en tres subáreas, SVE-1, SVE-2 y SVE-3.



Caso práctico 2. Sand Creek OU1

La subárea SVE-1 constaba de 13 pozos verticales y uno horizontal.



La subterránea SVE-2, con 12 pozos verticales



Y la subárea SVE-3 con 16 pozos verticales.

El sistema SVE utilizado fue complementado por un equipo de inyección de aire caliente (FIVE SYSTEM).

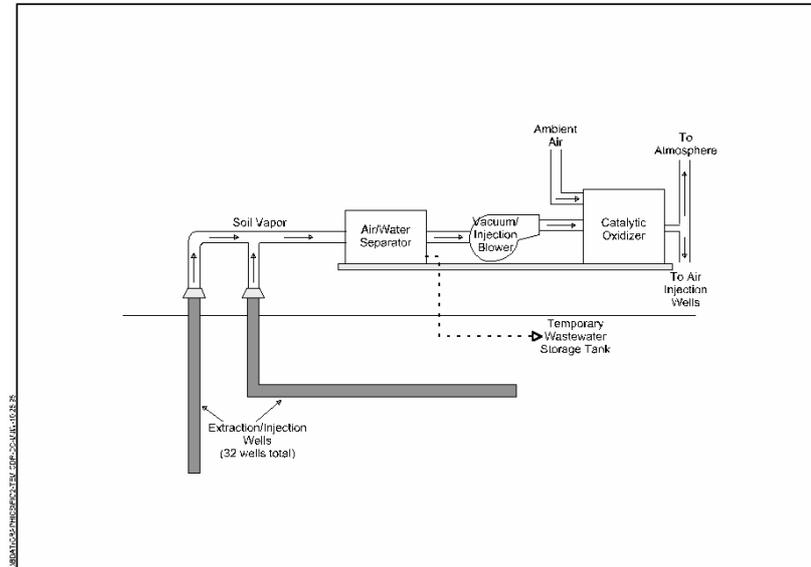
Algunos pozos funcionaron de modo alternativo: extracción por vacío que alternaba en otras fases con inyección de aire.

Los pozos operaron entre una profundidad de 1 m y 10 metros.

Distancia entre pozos fue de unos 18 m.



Caso práctico 2. Sand Creek OU1



Esquema de funcionamiento del SVE de Sand Creek.

El vapor del suelo extraído se hizo pasar a través de un separador aire/agua. Después el gas fue diluido con aire ambiental (entre el 12 y el 50% en volumen) y tratado en un oxidador catalítico. Una parte del aire así tratado se introdujo en el suelo a través de pozos verticales y horizontales (FIVE SYSTEM; durante las etapas finales cuando las concentraciones son más bajas) y otra parte se soltó a la atmósfera.



Unidad de oxidación catalítica.



Caso práctico 2. Sand Creek OU1

Situación inicial

Contaminantes.

	Concentraciones máximas en el sitio mg/kg
cloroformo	0,82
cloruro de metileno	5,8
TCE	0,09
PCE	9,34

Tricloroetileno (TCE),
Tetracloroetileno (PCE)



Caso práctico 2. Sand Creek OU1

Situación inicial

Contaminantes.

	Concentraciones máximas en el sitio mg/kg	Niveles permitidos mg/kg
cloroformo	0,82	0,2
cloruro de metileno	5,8	0,08
TCE	0,09	0,3
PCE	9,34	1,1

Niveles permitidos en el estado de Colorado
Tricloroetileno (TCE),
Tetracloroetileno (PCE)



Caso práctico 2. Sand Creek OU1

Situación inicial

Contaminantes.

	Concentraciones máximas en el sitio mg/kg	Niveles permitidos mg/kg	Número de veces que se supera el límite
cloroformo	0,82	0,2	5
cloruro de metileno	5,8	0,08	72
TCE	0,09	0,3	--
PCE	9,34	1,1	7

Número de veces que se supera el límite:

(concentración máxima en el sitio - nivel permitido) / nivel permitido

Niveles permitidos en el estado de Colorado

Tricloroetileno (TCE),

Tetracloroetileno (PCE)



Tratamiento

Procedimiento

32 pozos de extracción/inyección (uno de ellos horizontal),
3 bombas de vacío para la extracción,
1 separador de líquidos/gases,
2 compresores para la inyección de aire y
1 equipo para la depuración de los gases por oxidación catalítica.

Características del suelo.

Textura arenosa. Arenas 78%, limo + arcilla 22%. Humedad 31%.

Radio de influencia de los pozos de extracción resultó ser de 18 metros.

Los pozos se excavaron hasta una profundidad de 10 m.



Table 4. Operating Parameters

Parameter	September to December 1993	January to April 1994	Measurement Method
Air Flow Rate	2,681 scfm	2,910 scfm	N/A
Operating Pressure/Vacuum	22-24 inches of water column	13.4 to 23.8 inches of water column	N/A
Air Injection Rate	605 scfm under 12 inches of water column pressure	483 scfm under 18.3 inches of water column pressure	N/A

N/A - Measurement method not reported for this parameter because resulting value not expected to vary among measurement procedures.

Condiciones de trabajo del equipo



Resultado final

Table 6. Soil Cleanup Goals for VOCs

Compound	Cleanup Goals (mg/kg)
Chloroform	0.165
Methylene Chloride	0.075
Trichloroethene (TCE)	0.285
Tetrachloroethene (PCE)	1.095

Los objetivos de la limpieza fueron alcanzar los máximos permitidos por el Estado de Colorado.



Descontaminación de suelos Técnicas físicas y químicas. SVE

Caso práctico 2. Sand Creek OU1

Table 7. Analytical Results from Off-Site Laboratory for Confirmation Soil Borings*

Soil Boring	Depth (ft bgs)	Chloroform (mg/kg)	Methylene Chloride (mg/kg)	Trichloroethene (mg/kg)	Tetrachloroethene (mg/kg)
Cleanup Goal	-	0.165	0.075	0.285	1.095
CB-1	5-7	ND	ND	ND	0.200
CB-1	10-12	ND	ND	ND	0.005
CB-2	3-5	ND	ND	ND	0.032
CB-12	11-13	ND	ND	ND	0.280
CB-17	7-9	0.0078	ND	ND	ND
CB-18	15-17	0.0069	ND	ND	ND
CB-18	17-19	0.0099	ND	0.10	ND
CB-19	7-9	ND	ND	ND	0.0063
CB-19	9-11	ND	ND	ND	0.0059
CB-21	19.5-20	0.0071	ND	ND	0.066

ND - Not detected (detection limits not provided).

*Off-site laboratory analyses were performed for 61 samples (i.e., soil borings at specific depths). Only those 10 samples where at least one constituent was measured at a detectable concentration are shown on this table. All other samples were reported as ND for all four target constituents.

	Conc. máximas en el sitio mg/kg	permitido mg/kg	Número de veces que se supera el límite
cloroformo	0,82	0,2	5
cloruro de metileno	5,8	0,08	72
TCE	0,09	0,3	--
PCE	9,34	1,1	7

Una vez desconectado el sistema SVE se toman muestras (32) del suelo para comprobación del nivel de limpieza alcanzado (19 de abril de 1994).

En la tabla se muestra los resultados de aquellas muestras en las que se detectó al menos un contaminante, después de seis meses de tratamiento.

Los resultados demuestran que el sistema SVE utilizado fue efectivo para la contaminación de la Unidad Operativa 1 de Sand Creek.

Las reducciones en las concentraciones de los contaminantes fueron importantes:

Cloroformo, de 0,82 mg/kg antes a 0,0099 mg/kg después; claramente por debajo de los objetivos de la limpieza (0,2 mg/kg)

Cloruro de metileno, de 5,8 mg/kg antes a por debajo de límite de detección después; claramente por debajo de los objetivos de la limpieza (0,08 mg/kg)

TCE, de 0,09 antes a 0,1 mg/kg después; claramente por debajo de los objetivos de la limpieza (0,3 mg/kg)

PCE, de 9,34 antes a 0,066 mg/kg después; claramente por debajo de los objetivos de la limpieza (1,1 mg/kg).

Además menos del 20% de las muestras contenían al menos un contaminante por encima del límite de detección.



Table 9. Mass Extraction Rates and Mass Removal Quantities for SVE System Operation [8]

Parameter	September to December 1993	January to April 1994
Average Removal Rate for Target Compounds (lbs/day)	33.86	3.15
Average Removal Rate for Total VOCs (lbs/day)	1,482.6	482.4
Mass Extracted for Target Compounds (lbs)	2,899.7	349.6
Mass Extracted for Total VOCs (lbs)	122,456.6	53,547

NOTE: Total VOCs were analyzed using a modified EPA Method 8015. Non-halogenated VOCs, including the volatile portions of any semivolatiles present were measured, with gasoline range hydrocarbons prevalent in the chromatographs. Average mass extraction rates of contaminants were computed by multiplying the mean concentration by the mean volumetric flow rate between successive sampling episodes and converting to a daily rate (lb/day).

La intensidad de contaminantes extraídos en los dos primeros periodos muestra como se cumple que la efectividad del sistema SVE es muy grande durante el primer periodo (por ejemplo la masa total de contaminantes extraídos en el primer periodo fue de 33,86 a los 3,15 lbs/día del segundo).



Table 10. Cumulative Mass of Contaminants Extracted, Released to the Atmosphere, and Re-injected September 24, 1993 through April 27, 1994 (lbs)

	Target Compounds				Total Target Compounds*	Total VOCs*
	Methylene Chloride	Chloroform	Trichloro-ethene	Tetrachloro-ethene		
Extraction						
Subarea 1	0.0	0.0	0.0	5.2	5.2	69,096.7
Subarea 2	0.0	0.40	35.2	3,130.7	3,166.3	106,232.6
Subarea 3	0.0	13.4	0.0	69.8	83.2	1,175.2
Total	0.0	13.8	35.2	3,205.7	3,254.7	176,504.5
Release to Atmosphere						
Stack Emission	0.0	0.0	0.0	209.6	209.6	6,210.3
Injection						
Total	0.0	0.0	0.0	0.74	0.74	638.9

*Totals reflect rounding.

La tabla 10 resume las masas totales de contaminantes extraídos en las tres subáreas y el total, así como la concentración final del gas emitido a la atmósfera y el reinyectado al suelo después de la oxidación catalítica, durante todo el periodo de actuación (de 24 de septiembre de 1993 a 27 de abril de 1994).

Como se comprueba en la tabla durante le remediación por SVE se extrajo un total de 3.255 libras (1.476 kg) en las tres subáreas de los cuatro VOCS analizados y un total de VOCs de 176.500 libras (80.059 kg).

En total se soltaron a la atmósfera durante los seis meses de operación 6.200 libras (2.812 kg) de VOCs y una pequeña parte fue introducido de nuevo en el suelo (638,9 libras = 290 kg).



Table 11. Catalytic Oxidizer [8]

Parameter	September to December 1993	January to April 1994
Target Compounds Destruction Efficiencies (%)	92.9	99.1
Total VOCs Destruction Efficiencies (%)	95.5	98.8

$$\text{Destruction Removal Efficiency} = [1 - (M_{inj} + M_s) / M_{ext}] \times 100\%$$

- where: M_{inj} = Mass of contaminant injected to the subsurface (lb/day)
 M_s = Mass of contaminant emitted from the stack (lb/day)
 M_{ext} = Mass of contaminant extracted from the subsurface (lb/day)

La eficacia del procedimiento de destrucción por la oxidación catalítica usada fue del 99,1% en la fase final del proceso.



Tratamiento

Técnica. Arrastre de vapores in situ mediante vacío.

Procedimiento.

Características del suelo. Textura arenosa.
Arenas 78%, limo + arcilla 22%. Humedad entre 31 y 31%.

Total de suelo tratado. 40.844 m³, aproximadamente.

Duración de la operación. 6 meses.

Costes. 2.140.000 \$. A un coste unitario de 50 a 85 \$/m³.

40,844 m³ equivalen a dos campos de fútbol excavados a una profundidad de dos metros o al contenido de 2.723 camiones con una bañera media para transporte de tierras, que colocados uno detrás de otro formarían una fila de más de 16 km.



Situación actual. Los análisis dicen que la situación está controlada pero el aspecto de la superficie del suelo delata contaminación (según los análisis parece que no grave)



Las imágenes de satélite a los 12 años de la remediación parecen poner en evidencia la limpieza actual de los suelos de la zona.



Las imágenes parece indicar que sería necesaria una revisión actual de diversos sitios de la zona



Por lo menos la superficie de los suelos parece estar contaminada a nivel de foto de satélite.

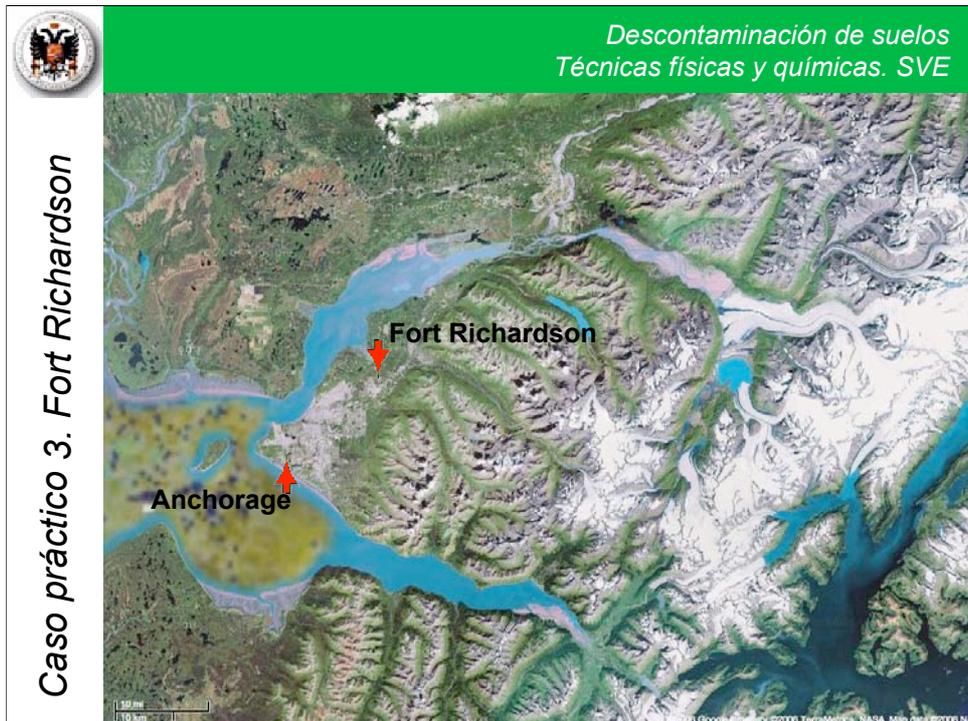


Caso práctico 3. Fort Richardson

Situación inicial

Localización. Anchorage, Alaska (USA).





Fort Richardson, Anchorage, Alaska (USA). El Fuerte Richardson fue construido en 1950, perteneciente a la Elmendorf Air Force Base, a 13 Km. de Anchorage (Alaska).



Caso práctico 3. Fort Richardson

Situación inicial

Localización. Fort Richardson Building 908 South, Anchorage, Alaska.

Origen de la contaminación. 1989 Fuga de un tanque de diesel.

Contaminantes.

VOCs halogenados y no halogenados;

BTEX;

clorobencenos e hidrocarburos del petróleo.

Concentraciones máximas:

DRO (17.000 mg/kg);

BTEX (22,8 mg/kg);

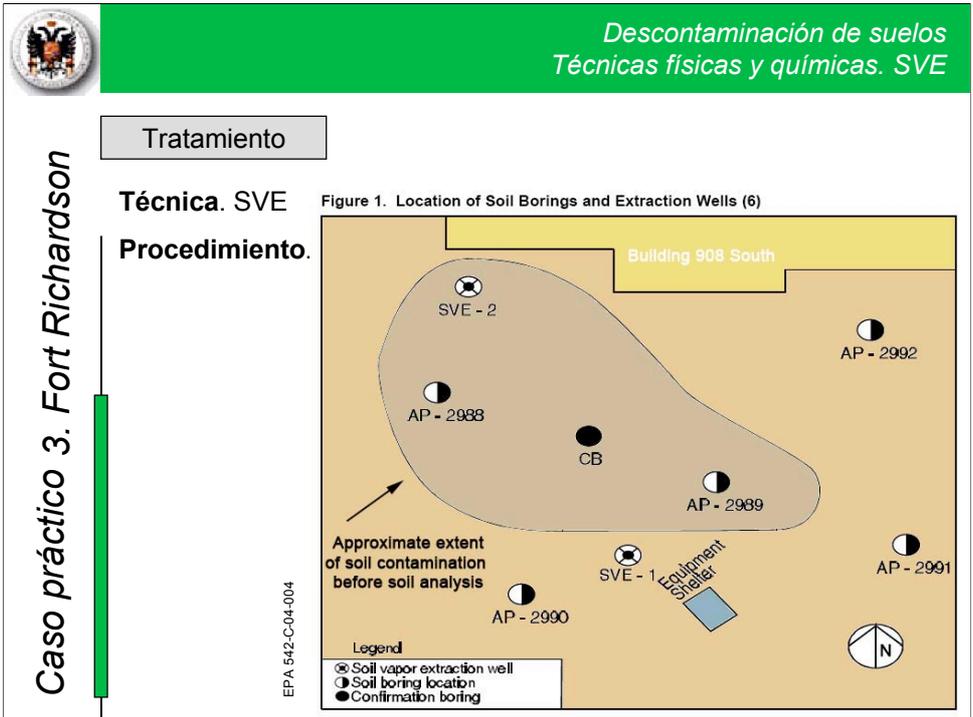
clorobencenos (11,93 mg/kg).

En 1989 se retiraron 4 tanques de carburantes diesel de capacidad 4.000 litros cada uno. Uno de ellos presentó una fuga que había contaminado al suelo.

BTEX = Benceno, tolueno, etilbenceno y xileno

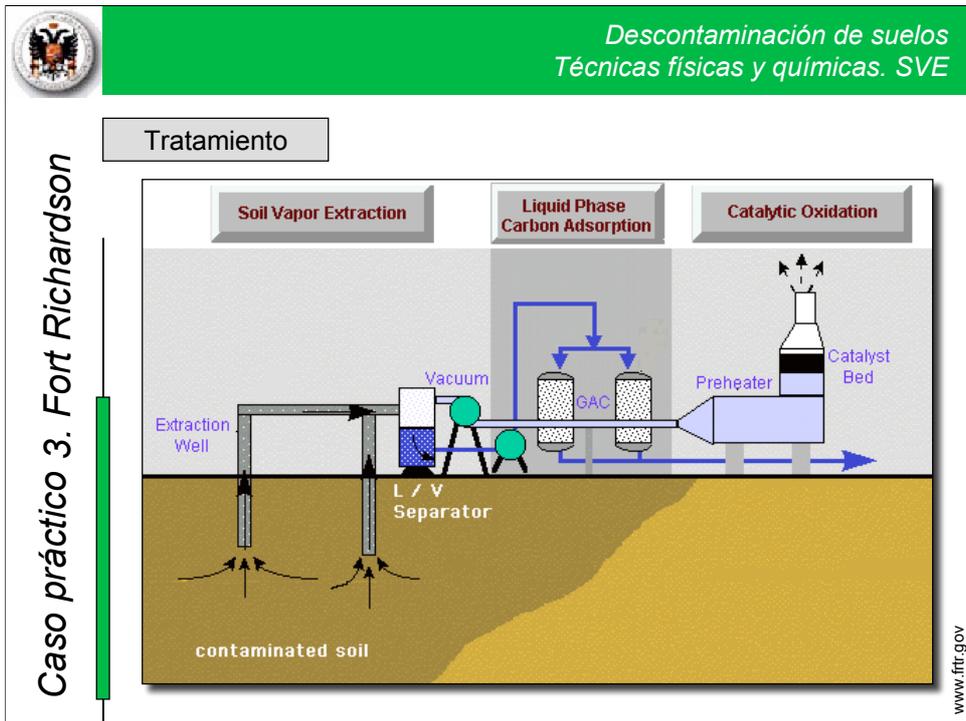
DRO = Petroleum hydrocarbons - diesel

NIVELES GENERICOS DE REFERENCIA: DRO, 200 mg/kg (100 veces mas); BTEX 17 mg/kg; clorobenceno, 1 mg/kg (11 veces).



Caso práctico 3. Fort Richardson

Se excavaron dos chimeneas de extracción verticales desde 2 a 17 m de profundidad (SVE-1 y SVE-2) y se realizaron 5 sondeos para analizar el suelo antes del tratamiento (pozos AP- ...) y se preparó otro pozo para la comprobación de la eficacia una vez terminado el tratamiento (pozo CB).



Mediante una bomba de vacío se extrajeron los contaminantes que pasaron por un separador líquido/gas y se liberaron a la atmósfera pasando previamente por un sistema depurador consistente en primer lugar por dos recipientes de carbón activo granulado y posteriormente por un equipo de oxidación catalítica.



Descontaminación de suelos
Técnicas físicas y químicas. SVE

Caso práctico 3. Fort Richardson

Table SB-1. Results of Analysis of Soil Borings Collected in September 1999* (4)

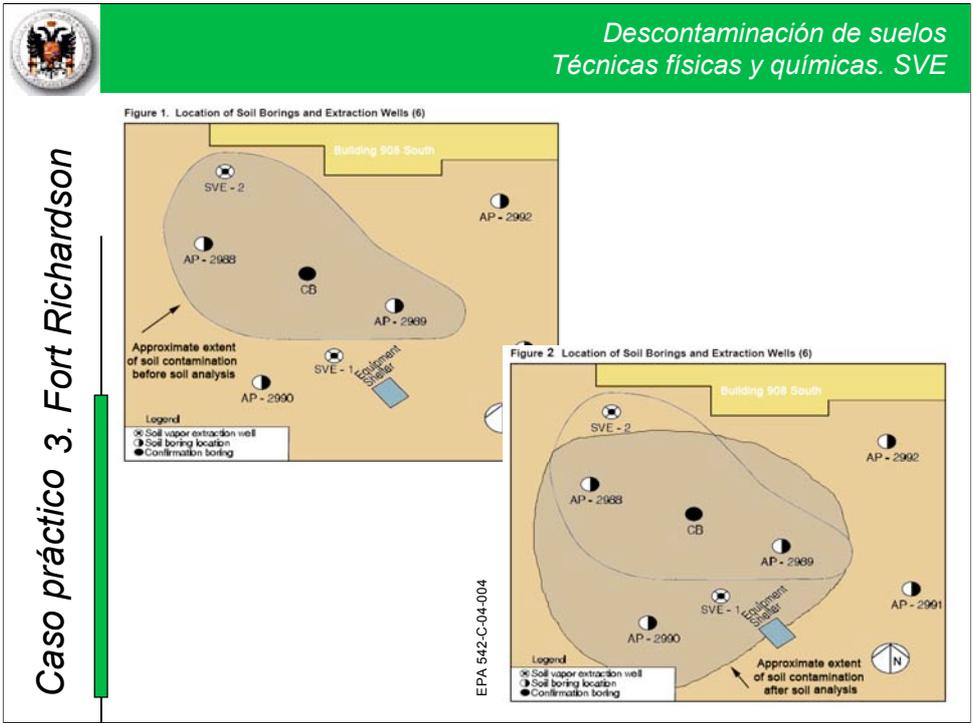
Bore Hole Number	AP-2988	AP-2988	AP-2988	AP-2988	AP-2989	AP-2989	AP-2989	AP-2989	AP-2989	AP-2989	AP-2990	AP-2990	AP-2990	
Sample ID (90FRUST.)	123	126	127	130	131	132	133SL QC	133SL QA	137	138	139	143	144SL QC	145SL QA
Sample Depth (ft)	20-21.5	35-36.5	40-41.5	45-46.5	>50	5-6.5	5-6.5	5-6.5	25-26.5	30-30.5	35-36.5	5-6.5	5-6.5	5-6.5
Petroleum Hydrocarbons (EPA Method 8015M) (mg/kg)														
Kerosene K-1	<2.4	<18	<19	18	<1.9	<8.9	NR	NR	<19	<18	<18	<1.8	NR	NR
Diesel fuel #2	17	<180	<19	1900**	160**	5300**	6300	17000	1800**	370**	43**	<1.8	NR	310
Jet Fuel A	<2.4	1200	460	<18	<1.9	<89	NR	NR	<190	<18	<18	74**	56	NR
Bunker Fuel #6D	<12	<92	94	<92	<97	<45	NR	NR	<93	<91	<91	<8.9	NR	NR
Volatile Organics (EPA Method 8020) (mg/kg)														
Benzene	<0.14	<0.54	<0.56	<0.05	<0.47	<0.63	NR	NR	0.11	<0.05	<0.01	<0.01	NR	NR
Toluene	<0.14	<0.54	4.1	<0.05	2.1	2.1	7.1	0.016	0.39	<0.05	<0.01	<0.01	NR	0.012
Chlorobenzene	<0.14	1.4	6.7	0.22	1.1	2.7	6.5	NR	0.529	0.045	<0.01	<0.01	NR	NR
Ethylbenzene	<0.14	<0.54	<0.56	<0.05	<0.57	0.75	2.4	0.23	0.12	<0.05	<0.01	<0.01	NR	0.008
m-Xylene	0.38	4.3	10.0	0.72	1.8	11.0	70.0	0.215	1.4	0.1	0.046	<0.01	NR	0.06
p-Xylene	<0.14	<0.54	<2.5	<0.05	1.3	18.0	NR	NR	0.26	0.054	0.013	<0.01	NR	0.015
m-Dichlorobenzene	0.85	8.4	5.9	0.49	1.3	11.0	2.4	NR	2.1	0.21	0.12	<0.02	NR	NR
p-Dichlorobenzene	<0.28	11.0	8.8	3.0	6.7	51.0	91.0	NR	9.3	1.2	0.48	<0.02	NR	NR

* Results are summarized here only for those samples in which at least one contaminant was detected at a concentration of 1 mg/kg or higher. Additional analytical data on soil borings are provided in reference 4.
 ** Laboratory estimate
 NR = Not Reported

EPA 542-C-04-004

En esta tabla se reproducen los análisis de las muestras de suelo antes del tratamiento (de los cinco pozos de muestreo sólo se reproducen los que dieron concentración de algún contaminante por encima de los límites permitidos, que fueron las correspondientes a tres pozos, los otros dos, por tanto, no resultaron contaminados a nivel tóxico).

Los pozos con contaminación fueron: 2988, 2989 y 2990



Rectificación del área de suelo contaminado tras el análisis de las muestras de suelo de los sondeos.



Descontaminación de suelos
Técnicas físicas y químicas. SVE

Caso práctico 3. Fort Richardson

Table SB-1. Results of Analysis of Soil Borings Collected in September 1999* (4)

Bore Hole Number	AP-2988	AP-2988	AP-2988	AP-2988	AP-2988	AP-2989	AP-2989	AP-2989	AP-2989	AP-2989	AP-2989	AP-2990	AP-2990	AP-2990
Sample ID (90FRUST.)	123	126	127	130	131	132	133SL QC	133SL QA	137	138	139	143	144SL QC	145SL QA
Sample Depth (ft)	20-21.5	35-36.5	40-41.5	45-46.5	>50	5-6.5	5-6.5	5-6.5	25-26.5	30-30.5	35-36.5	5-6.5	5-6.5	5-6.5
Petroleum Hydrocarbons (EPA Method 8015M) (mg/kg)														
Kerosene K-1	<2.4	<18	<19	18	<19	<8.9	NR	NR	<19	<18	<18	<1.8	NR	NR
Diesel fuel #2	17	<180	<19	1900**	160**	5300**	6300	17000	1800**	370**	43**	<1.8	NR	310
Jet Fuel A	<2.4	1200	460	<18	<1.9	<89	NR	NR	<190	<18	<18	74**	56	NR
Bunker Fuel #6D	<12	<92	94	<92	<97	<45	NR	NR	<93	<91	<91	<8.9	NR	NR
Volatile Organics (EPA Method 8020) (mg/kg)														
Benzene	<0.14	<0.54	<0.56	<0.05	<0.47	<0.63	NR	NR	0.11	<0.05	<0.01	<0.01	NR	NR
Toluene	<0.14	<0.54	4.1	<0.05	2.1	2.1	7.1	0.016	0.39	<0.05	<0.01	<0.01	NR	0.012
Chlorobenzene	<0.14	1.4	6.7	0.22	1.1	2.7	6.5	NR	0.529	0.045	<0.01	<0.01	NR	NR
Ethylbenzene	<0.14	<0.54	<0.56	<0.05	<0.57	0.75	2.4	0.23	0.12	<0.05	<0.01	<0.01	NR	0.008
m-Xylene	0.38	4.3	10.0	0.72	1.8	11.0	70.0	0.215	1.4	0.1	0.046	<0.01	NR	0.06
p-Xylene	<0.14	<0.54	<2.5	<0.05	1.3	18.0	NR	NR	0.26	0.054	0.013	<0.01	NR	0.015
m-Dichlorobenzene	0.85	8.4	5.9	0.49	1.3	11.0	2.4	NR	2.1	0.21	0.12	<0.02	NR	NR
p-Dichlorobenzene	<0.28	11.0	8.8	3.0	6.7	51.0	91.0	NR	9.3	1.2	0.48	<0.02	NR	NR

* Results are summarized here only for those samples in which at least one contaminant was detected at a concentration of 1 mg/kg or higher. Additional analytical data on soil borings are provided in reference 4.
 ** Laboratory estimate
 NR = Not Reported

EPA 542-C-04-004

Los contaminantes resultaron ser diversos tipos de diesel y carburantes junto a compuestos de las gasolinas.

Dentro de los hidrocarburos del petróleo, las máximas concentraciones se dieron para el diesel fuel nº 2 con 17.000 mg/kg.

Dentro de los VOCs las máximas concentraciones para los distintos compuestos se señalan en rojo en la tabla.



Resultado final

Resultados

Objetivos

Table CL-1. Cleanup Levels for Soil at
Ft. Richardson Building 908 South (4)

Contaminant	Cleanup Level (mg/kg)
DRO	200
GRO	100
Benzene	0.5
Total BTEX	15

Reproducción de los valores máximos permitidos y por tanto la meta de este tratamiento SVE.

GRO, Gasoline range organics (compuestos orgánicos derivados de las gasolinas)

DRO, Diesel range organics



Resultado final

Caso práctico 2. Sand Creek

Table TPD-2. Results of Analysis of Soil Boring Collected March 1996

Depth (ft bgs)	DRO (mg/kg)	GRO (mg/kg)	Benzene (mg/kg)	Total BTEX (mg/kg)
Cleanup Level	200	100	0.5	15
25	53	20	ND	0.199
30	10	ND	ND	ND
30 (duplicate sample)	7	ND	ND	ND
35	ND	ND	ND	ND
40	ND	ND	ND	ND
45	15	ND	ND	ND
50	10	ND	ND	ND

Las concentraciones de todos los contaminantes quedaron por debajo de los límites fijados por los organismos estatales para todos los suelos tratados.

GRO, Gasoline range organics (compuestos orgánicos derivados de las gasolinas)

DRO, Diesel range organics

Caso práctico 3. Fort Richardson

Restauración de suelos orgánicos. SVE

después ←

antes ↓

Table TPD-2. Results of Analysis of Soil Boring Collected March 1996

Depth (ft bgs)	DRO (mg/kg)	GRO (mg/kg)	Benzene (mg/kg)	Total BTEX (mg/kg)
Cleanup Level	200	100	0.5	15
25	53	20	ND	0.199
30	10	ND	ND	ND
30 (duplicate sample)	7	ND	ND	ND
35	ND	ND	ND	ND
40	ND	ND	ND	ND
45	15	ND	ND	ND
50	10	ND	ND	ND

Table SB-1 Results of Analysis of Soil Borings Collected in September 1989* (4)

Bore Hole Number	AP-2988	AP-2988	AP-2988	AP-2988	AP-2988	AP-2989	AP-2989	AP-2989	AP-2989	AP-2989	AP-2989	AP-2990	AP-2990	AP-2990
Sample ID (SOFRUST-)	123	126	127	130	131	132	133SL QC	133SL QA	137	138	139	143	144SL QC	145SL QA
Sample Depth (ft)	20-21.5	35-36.5	40-41.5	45-46.5	>50	5-6.5	5-6.5	5-6.5	25-26.5	30-30.5	35-36.5	5-6.5	5-6.5	5-6.5
Petroleum Hydrocarbons (EPA Method 8015M) (mg/kg)														
Kerosene K-1	<2.4	<18	<19	18	<1.9	<8.9	NR	NR	<19	<18	<18	<1.8	NR	NR
Diesel fuel #2	17	<180	<19	1900**	160**	5300**	8300	17000	1800**	370**	43**	<1.8	NR	310
Jet Fuel A	<2.4	1200	460	<18	<1.9	<89	NR	NR	<190	<18	<18	74**	56	NR
Bunker Fuel #6D	<12	<92	54	<92	<97	<45	NR	NR	<93	<91	<91	<8.9	NR	NR
Volatile Organics (EPA Method 8240) (mg/kg)														
Benzene	<0.14	<0.54	<0.56	<0.05	<0.47	<0.63	NR	NR	0.11	<0.05	<0.01	<0.01	NR	NR
Toluene	<0.14	<0.54	4.1	<0.05	2.1	2.1	7.1	0.016	0.39	<0.05	<0.01	<0.01	NR	0.012
Chlorobenzene	<0.14	1.4	6.7	0.22	1.1	2.7	6.5	NR	0.529	0.045	<0.01	<0.01	NR	NR
Ethylbenzene	<0.14	<0.54	<0.56	<0.05	<0.57	0.75	2.4	0.23	0.12	<0.05	<0.01	<0.01	NR	0.008
m-Xylene	0.38	4.3	10.0	0.72	1.8	11.0	70.0	0.215	1.4	0.1	0.046	<0.01	NR	0.06
p-Xylene	<0.14	<0.54	<2.5	<0.05	1.3	18.0	NR	NR	0.26	0.054	0.013	<0.01	NR	0.015
m-Dichlorobenzene	0.85	8.4	5.9	0.49	1.3	11.0	2.4	NR	2.1	0.21	0.12	<0.02	NR	NR
o, p-Dichlorobenzene	<0.28	11.0	8.8	3.0	6.7	51.0	91.0	NR	9.3	1.2	0.48	<0.02	NR	NR

* Results are summarized here only for those samples in which at least one contaminant was detected at a concentration of 1 mg/kg or higher. Additional analytical data on soil borings are provided in reference 4.
 ** Laboratory estimate
 NR = Not Reported

Las cantidades de contaminantes eliminados en algunos casos fueron realmente importantes. Por ejemplo, para los derivados hidrocarburos del diesel se pasó de un máximo de 17.000 mg/kg antes del tratamiento a 53 mg/kg después. y el total de BTEX 148,5 mg/kg antes a 0,2 mg/kg después.

GRO, Gasoline range organics (compuestos orgánicos derivados de las gasolinas)

DRO, Diesel range organics



Resultados

Técnica. SVE.

Procedimiento. Se excavaron dos chimeneas de extracción verticales desde 2 a 17 m de profundidad y se realizaron 5 sondeos para analizar el suelo. Mediante una bomba de vacío se extrajeron los contaminantes que se liberaron a la atmósfera pasando previamente por un depurador.

Características del suelo. Textura arenosa con abundantes gravas. Procedente de la edafización de sedimentos no consolidados (tillitas) de texturas gruesas.

Total de suelo tratado. 3.500 m³, aproximadamente.

Duración de la operación. 4 años.

Costes. 557.000 \$. A un coste unitario de 72 \$/m³ de suelo tratado.

3.500m³ aprox 233 camiones (una fila de 1,5 km)



Situación inicial

Localización. New Mexico (USA).

Caso práctico 4. Holloman

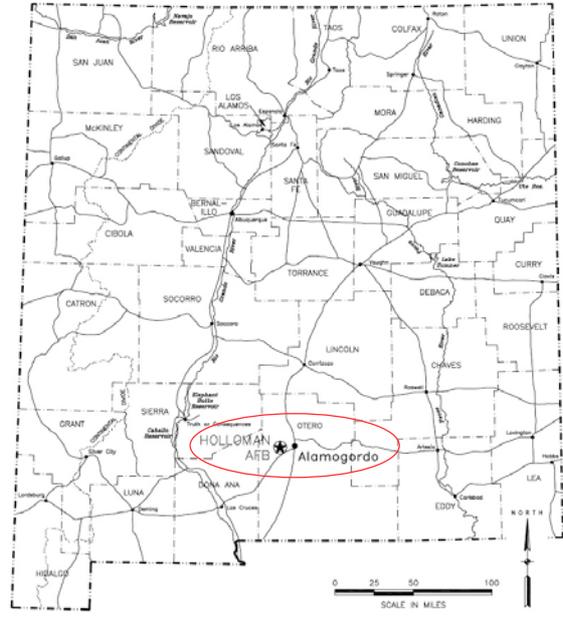




Situación inicial

Caso práctico 4. Holloman

Localización.
Holloman AFB
(Air Force Base),
New Mexico (USA).



Holloman AFB (Air Force Base).

La base aérea de Holloman ocupa una extensión de más de 24.000 ha en el centro/sur del Estado de New Mexico.

Se encuentra muy cercana a la localidad de Alamogordo (a unos 11 km al oeste)



Origen de la contaminación.

Cerca del aeropuerto militar hay unas trincheras donde se almacenan los carburantes y lubricantes. En 1978 se produce una liberación desde uno de los depósitos enterrados de unos 114.000 litros de fuel para avión (JP-4 fuel).



Situación inicial

Caso práctico 4. Holloman

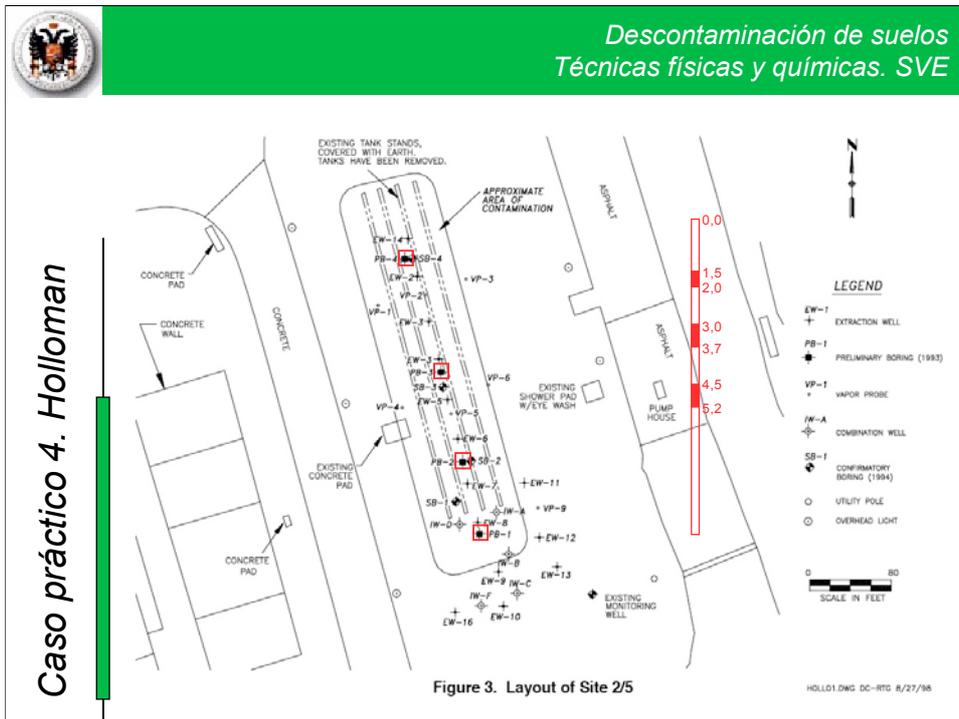
Localización. Holloman AFB (Air Force Base), New Mexico (USA).

Origen de la contaminación. 1978 Fuga de gasolina de aviación de un depósito subterráneo (113.562 litros).

Contaminantes. Hidrocarburos del petróleo, benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX).

Área contaminada. Parcela de 24 x 60 m (1.440 m²) x 5 de profundidad (7.200 m³)

Holloman AFB, New Mexico



ESTUDIO PREVIO

Para evaluar la contaminación del suelo se excavaron cuatro calicatas en la línea central de la zona de contaminación (60m de largo por 25 de ancho), aproximadamente cada 15 metros. Los pozos fueron muestreados en tres zonas, de 1,5 a 2 m de prof., de 3 a 3,7 m y de 4,5 a 5,2 m.

La contaminación dio un valor medio de 3.000 mg/kg de TPH (Total Petroleum Hydrocarbons).



Descontaminación de suelos
Técnicas físicas y químicas. SVE

Caso práctico 4. Holloman

Average Soil Concentrations from Borings Performed During the RI and PDI at Site 2/5	
Parameter	Average Concentration
Benzene	1,887 $\mu\text{g}/\text{kg}$
Toluene	11,824 $\mu\text{g}/\text{kg}$
Ethylbenzene	33,710 $\mu\text{g}/\text{kg}$
Xylene	62,362 $\mu\text{g}/\text{kg}$
TPH	1,565 mg/kg

Objetivos de la limpieza

Benceno	25.000 $\mu\text{g}/\text{kg}$
Tolueno	100.000 $\mu\text{g}/\text{kg}$
Etilbenceno	100.000 $\mu\text{g}/\text{kg}$
Xileno	100.000 $\mu\text{g}/\text{kg}$
TPH	1.000 mg/kg

Table C-1. Characteristics of Untreated Soil *

Boring ID (Depth)	Maximum Benzene Concentration Found ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	Maximum Toluene Concentration Found ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	Maximum Xylene (total) Concentration Found ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	Maximum Ethylbenzene Concentration Found ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	Maximum TPH Contamination Found (mg/kg)
SB-02&5-09 (15-17 ft bgs)	12,000	16,000	150,000	62,000	17,500
SB-02&5-12 (15-17 ft bgs)	48,000	210,000	450,000	180,000	5,220
SB-02&5-18 (16-18 ft bgs)	15,700	43,500	244,000	101,000	5,050
SB-02&5-19 (8-10 ft bgs)	1,060	41,900	332,000	87,000	5,600
SB-02&5-21 (6-8 ft bgs)	3,950	78,800	500,000	135,000	5,600

*Results from selected samples collected during the RI and PDI.

La tabla de arriba representa los valores medios de las muestras de suelos antes del tratamiento.

La tabla de abajo representa las máximas concentraciones en algunas muestras antes del tratamiento.

OJO! Concentraciones en microgramos y en miligramo

Los valores medios no se superaban para ningún contaminante, pero si localmente.

Con respecto al total de TPH se superaban los valores medios y los máximos de todos los emplazamientos.



Tratamiento

Caso práctico 4. Holloman

ALTERNATIVAS DE REMEDIACIÓN (1993)

- Alternativa 1. No acción;
- Alternativa 2. Recubrimientos con arcillas;
- Alternativa 3. In situ tratamiento (SVE);
- Alternativa 4. Excavación, tratamiento térmico on site y almacenamiento on site del suelo tratado;
- Alternativa 5 . Excavación y almacenamiento off-site.

La normativa de la NCP (The National Contingency Plan) obliga a EPA a presentar un conjunto de medidas de remediación que son agrupadas en una serie de alternativas de remediación y una de ellas ha de ser “la no acción”, que sirve como nivel de referencia para comparación de las demás alternativas de “si actuación”.

Para este sitio se propusieron cinco alternativas de remediación.



Tratamiento

Caso práctico 4. Holloman

DEFINICIÓN DE ALTERNATIVAS (1993)

Alternativa 1. No acción;

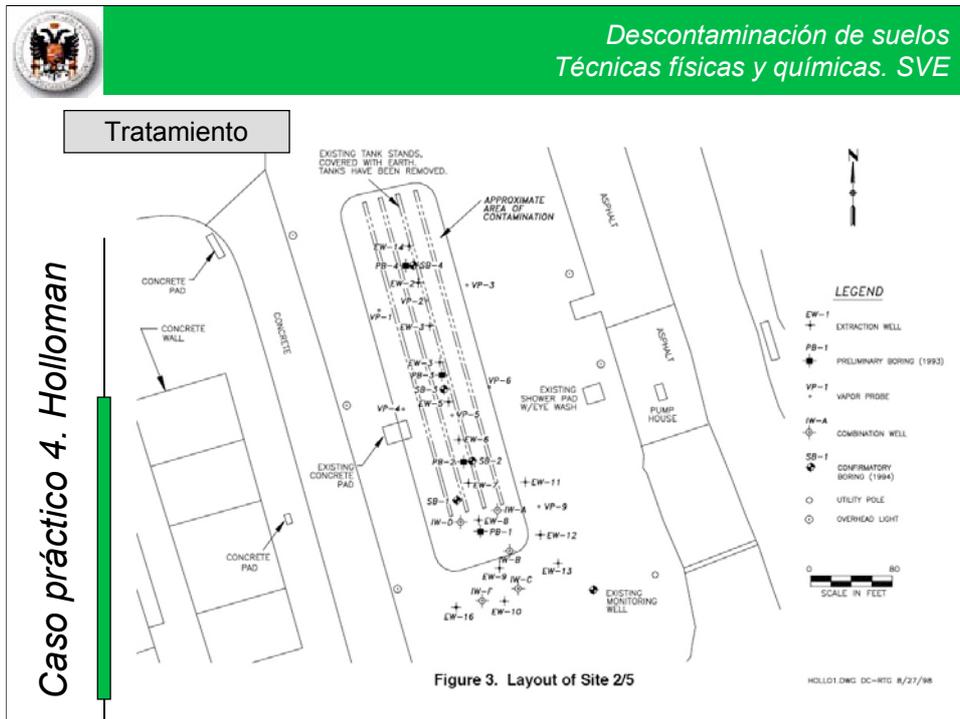
Alternativa 2. Recubrimientos con arcillas;

Alternativa 3. In situ tratamiento (SVE);

Alternativa 4. Excavación, tratamiento térmico on site y
almacenamiento on site del suelo tratado;

Alternativa 5 . Excavación y almacenamiento off-site.

Record of Decision (1995) se elije la opción 3



CONSTRUCCIÓN DEL PROYECTO

Se excavaron: 16 pozos de extracción y 6 pozos con una combinación de vacío y ventilación pasiva; 9 pozos para monitoreo durante el proceso; 4 para el muestreo preliminar; y otros 4 para confirmación para después del tratamiento.

Para la extracción al vacío se utilizó una bomba de 2 caballos conectada a los pozos a través de tuberías, llaves, manómetros, ... Como medida de precaución todo el recinto se aisló con una cerca.



Tratamiento

Caso práctico 4. Holloman

Características del suelo. Arenas y limos, estratificadas típicas de llanura de inundación.

Hidrología. Acuífero confinado a 5 metros

Total de suelo tratado. 12.500 m³, aproximadamente.

Duración de la operación. Tres años y medio.

Existe un acuífero confinado a 5 metros de profundidad en el que no existe ningún pozo para extracción de agua.

Tres años y medio (abril 1995 a octubre 1998).



Caso práctico 4. Holloman

OPERATING PARAMETERS AFFECTING TREATMENT COST OR PERFORMANCE

Air Flow Rate (typical)	70 standard cubic feet per minute (SCFM)
Operating Pressure/Vacuum (typical)	25.0 inches of water (since 11/96)
Operating Time	23,492 hours of operation through June 1998
Air Discharge Temperature (typical)	65-75 degrees Fahrenheit

70 pies cubicos/minuto = 1.982 litros/minuto

25 pulgadas = 63,5 cm

65 a 75 grados Farenheit = 18 a 24 °C



Al final se utilizaron 9 pozos para comprobar los resultados del tratamiento.



Descontaminación de suelos
Técnicas físicas y químicas. SVE

Caso práctico 4. Holloman

Table TPD-1. Preliminary and Interim Confirmatory Soil Sampling Data at Site 2/5 [10]

Boring ID (Location)	Depth Interval (feet bgs)		Benzene Concentration (ug/kg)		Toluene Concentration (ug/kg)		Xylene (total) Concentration (ug/kg)		Ethylbenzene Concentration (ug/kg)		TPH Concentration (ug/kg)	
	12/94	09/96	12/94	09/96	12/94	09/96	12/94	09/96	12/94	09/96	12/94*	09/96
Date/Boring ID	12/94	09/96	12/94	09/96	12/94	09/96	12/94	09/96	12/94	09/96	12/94*	09/96
SB-01 (south end)	5-7	4-8	ND	ND	9,100	ND	90,000	ND	27,000	120	1,100	244
	10-12	9.5-10.5	ND	ND	35,000	ND	44,000	38,000	13,000	6,500	490	945
	15-17	13-15	2,900	ND	27,000	ND	130,000	32,000	49,000	4,800	760	787
	NS	13-5 (top)	NS	ND	NS	ND	NS	35,000	NS	5,300	NS	1,530
SB-02	5-7	5-6	ND	ND	21,000	ND	79,000	410	48,000	99	970	619
	10-12	9.5-10.5	ND	ND	6,900	ND	71,000	260,000	22,000	19,000	820	4,030
	15-17	14-15	ND	ND	5,900	ND	70,000	200,000	28,000	56,000	520	2,670
SB-03	5-7	4.5-5.5	ND	ND	14,000	ND	130,000	ND	26,000	ND	140	2,080
	10-12	10-11	ND	ND	6,300	ND	70,000	14,000	19,000	1,700	560	895
	15-17	13-15	24,000	ND	45,000	ND	130,000	110,000	59,000	33,000	890	1,640
SB-04 (north end)	5-7	4.5-5.5	ND	ND	4,100	ND	60,000	170	27,000	ND	390	440
	10-12	10-11	1,000	ND	18,000	ND	180,000	220,000	65,000	82,000	1,400	3,930
	15-17	14-15	810	2,300	6,400	5,800	50,000	75,000	19,000	26,000	480	962
	5-7(top)	NS	ND	NS	1,700	NS	11,000	NS	4,600	NS	1,100	962

ND - Not Detected
NS - Not Sampled
* - 12/94 results were determined to be anomalous for TPH. 3000 mg/kg TPH was assumed to be the initial soil concentration.

Table TPD-2. Final Confirmatory Soil Sampling Results (13)

Boring ID	Depth (feet bgs)	Benzene Concentration (mg/kg)	Toluene Concentration (mg/kg)	Ethylbenzene Concentration (mg/kg)	Xylene Concentration (mg/kg)	TPH Concentration (mg/kg)
LT01	10-11	ND	ND	ND	ND	390
	17-18	ND	ND	8.6	100.0	300
LT02	13-14	ND	ND	28.0	4.0	170
	16-17	ND	ND	ND	0.9	ND
LT03	12-13	1.1	9.9	72.0	254.0	220
	17-18	ND	0.7	6.5	16.9	67
LT04	11-12	ND	3.6	41.0	103.0	80
	16-17	9.1	65.0	190.0	379.0	130
LT05	11-12	ND	ND	ND	ND	ND
LT06	12.5-13.5	ND	0.4	5.7	60.0	150

La tabla de arriba muestra los resultados intermedios del proceso (a los 22 meses) y en la de abajo se resumen los resultados finales.

A los 22 meses ya las concentraciones se había reducido a valores mínimos para el tolueno, a valores bajos para y benceno, etilbenceno y TPH, pero manteniéndose para el xileno. Estos valores indicaron la necesidad de continuar el tratamiento. 15 meses después la reducción de las concentraciones fue generalizada para todos los contaminantes.

Los objetivos que se fijaron par la limpieza fueron:

TPH - 1000 mg/kg

Benceno - 25 mg/kg; y 100.000 mg/kg para tolueno, etilbenceno y xileno.



Eficacia

September 1996

TPH	47%
Benzene	53%
Toluene	91%
Ethylbenzene	42%
Xylenes (total)	12%

October 1997

TPH	95%
Benzene	99%
Toluene	99%
Ethylbenzene	99%
Xylenes (total)	99%

La eficacia del tratamiento, al final, fue muy elevada para todos los contaminantes.



Costes. 548.046 \$. A un coste unitario de 76 \$/m³ de suelo tratado.

**Table Cost 1. Summary of Costs for SVE Activities at Site 2/5
Categorized According to the WBS (12)**

WBS No.	Activity	Cost (\$)	Comment
33-01 and 33-21	Mobilization and demobilization	34,884	Before treatment activities
33-02	Sampling and Analysis	21,941	Sampling ongoing
33-113-23	SVE installation costs	286,822	
33-113-23-02-08	SVE system O&M	267,000	Treatment ongoing

Los costes del tratamiento