

01177
9



Universidad Nacional
Autónoma de
México

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

FACULTAD DE INGENIERÍA

CAMPUS MORELOS

REHABILITACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS
Y REÚSO COMO CAPA SELLADA

TESIS
COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRÍA EN INGENIERÍA
AMBIENTAL

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

PRESENTA:
ING. ARTURO HERNÁNDEZ ANTONIO

DIRIGIDO POR:
DR. MANFRED VAN AFFERDEN



Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas
UNAM a difundir en formato electrónico el
contenido de mi trabajo 1903
JHUTEPEC, MORELOS
NOMBRE: Arturo Hernández
Antonio
FECHA: 19 de Junio 2003
FIRMA: [Signature]

JUNIO DE 2003

A



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología "CONACyT", por su financiamiento y apoyo brindado para la realización de estudios de Maestría.

A la Universidad Nacional Autónoma de México "UNAM", por haberme cobijado dentro de sus aulas brindándome siempre la sabia sabiduría de sus maestros.

Al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, por darme albergue en el laboratorio de Mecánica de Suelos e Hidrogeoquímica.

Al cuerpo académico de mi jurado de tesis que, de una manera desinteresada revisaron e hicieron sus observaciones y sugerencias siempre acertadas para el enriquecimiento del presente trabajo.

Dra. Susana Saval Bohórquez
Dr. Manfred Van Afferden
M.C. Rolando Salvador García Gómez
Dra. Anne Hansen Hansen
M.I. Ana Elisa Silva Martínez

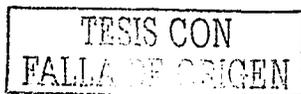
Un agradecimiento especial a mi director de tesis: Dr. Manfred Van Afferden, por transmitir de una manera sabia sus conocimientos que vinieron a ser de gran aportación en mi formación profesional, gracias por su paciencia.

Al M.I. Isaac Bonola Alonso por su enseñanza en pruebas de laboratorio de Mecánica de Suelos, amigo gracias por tú apoyo.

A la M.I. Rosa Angélica Guillén Garcés por su paciencia y disposición para guiarme en la enseñanza del manejo de laboratorio de Hidrogeoquímica, hermana gracias.

Al personal de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, Campus Morelos, en especial a la Sra. Marylu, gracias por su amabilidad.

A mis compañeros de Maestría por haber compartido largos momentos que me hicieron sentir como en familia, en especial a mis amigos Raúl Alberto Acosta Pérez, Ivette René Hansen Rodríguez, Carolina Santacruz compañeros de gratos momentos.



DEDICATORIA

A Dios

Por haberme permitido cumplir con uno más de mis sueños y por darme la oportunidad de conocer las maravillas de su creación, por lo que puedo decir que:

“Todo lo puedo en Cristo que me fortalece”
Filipenses 4:13

A Yodina Elizabeth Díaz Vidal

Por tu comprensión y ánimos brindados en momentos de desaliento

A mis padres y hermanos “Carlos, David y Natanael

Quienes siempre mostraron su apoyo y confianza en cada una de mis acciones

A Pedro Sánchez Leyva y familia

Amigo y hermano por sus ánimos y consejos

A Jesús Antonio Reyes

Amigo y hermano que a sido un ejemplo a seguir

A Eleazar Luna Barraza

Consejero y amigo

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Problemática de la contaminación de suelos en México	2
1.2 Formas de contaminación	3
1.3 Sitios contaminados con desechos peligrosos	3
1.4 Justificación	5
1.5 Hipótesis	5
1.6 Objetivo general	5
1.6.1 Objetivos específicos	5
1.7 Alcances y limitaciones	6
2 MARCO TEÓRICO	7
2.1 Contaminación por metales pesados	7
2.2 Dinámica de los metales pesados en el suelo	7
2.3 Descripción del cadmio	8
2.3.1 Principales usos del cadmio	9
2.3.2 Efectos del cadmio en la salud	9
2.4 Clasificación de las tecnologías de saneamiento	9
2.5 Tecnologías de saneamiento para suelos	11
2.5.1 Incineración	12
2.5.2 Estabilización/solidificación	13
2.5.3 Vitrificación	15
2.5.4 Biorremediación	16
2.5.5 Lavado de suelo	17
2.5.6 Extracción con vapor	18
2.5.7 Encapsulación	19
2.5.8 Desorción térmica	20
2.5.9 Tratamientos químicos	21
2.6 Tecnología de inmovilización	23
2.6.1 Adsorción de contaminantes por adsorbentes naturales	24
2.6.1.1 Bentonita cálcica	24
2.6.1.2 Bentonita sódica	25
2.6.1.3 Óxido de hierro	26
2.6.1.4 Carbón activado	26
2.6.1.5 Carbón metalúrgico o "coke"	27
2.6.2 Parámetros que influyen en la inmovilización	28
2.6.3 Impermeabilización de suelos contaminados	29
2.6.4 Reúso de suelos contaminados como capa sellada	34
2.6.4.1 Aspectos básicos de relleno sanitario	34
2.6.4.2 Requisitos para el diseño de una capa sellada	35

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

3 METODOLOGÍA	38
3.1 Características de los suelos	38
3.2 Mecánica de suelos	40
3.2.1 Mezclas	40
3.2.2 Prueba de compactación	41
3.2.3 Permeabilidad	46
3.3 Hidrogeoquímica	48
3.3.1 Diseño e instalación de columnas de suelo	48
3.3.2 Desorción del cadmio en columnas de suelo para estudio de lixiviados	54
3.4 Estimación de costos para la aplicación de la tecnología	55
3.4.1 Escenarios	55
4 RESULTADOS Y DISCUSIONES	56
4.1 Mecánica de suelos	56
4.1.1 Determinación de la humedad óptima	56
4.1.2 Determinación de la permeabilidad	59
4.2 Hidrogeoquímica	61
4.2.1 Prueba de funcionamiento del diseño de experimento en columnas de acrílico	62
4.2.2 Prueba de funcionamiento del diseño de experimento en columnas de jeringas	64
4.2.3 Pruebas de funcionamiento en columnas de suelo en jeringa con cloruro de sodio	65
4.2.4 Desorción del cadmio en columnas de suelo para estudio de lixiviados	67
4.3 Estimación de costos para la aplicación de la tecnología	71
4.3.1 Escenarios	71
4.3.2 Actividades	74
4.3.3 Análisis de costos	74
5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	77
6 BIBLIOGRAFÍA	79
ANEXO	83

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	2.1:	Dinámica de los metales pesados en suelos	8
Figura	2.2:	Reducción de la conductividad hidráulica por la adición de partículas finas	23
Figura	2.3:	Cambio en el equilibrio de la adsorción por la adición de los adsorbentes naturales y la reducción en la concentración de los contaminantes móviles en el agua de los poros	24
Figura	2.4:	Construcción de un relleno sanitario, "medidas de sellado en gran escala para prevenir la infiltración de contaminantes"	35
Figura	2.5:	Componentes de una capa sellada	36
Figura	2.6:	Componentes de cobertura final norma alemana	36
Figura	2.7:	Componentes de la base norma alemana	37
Figura	2.8:	Componentes de cobertura final norma mexicana	37
Figura	2.9:	Componentes de la base norma mexicana	37
Figura	3.1:	Diagrama de flujo correspondiente para cada material	41
Figura	3.2:	Permeámetro de carga constante	48
Figura	3.3:	Dimensiones de la columna de la 1ª alternativa	49
Figura	3.4:	Primera alternativa	49
Figura	3.5:	Metodología para evaluar la migración del cloruro de sodio en el sistema de acrílico	52
Figura	3.6:	Segunda alternativa	52
Figura	3.7:	Metodología para evaluar la migración del cloruro de sodio en el sistema de jeringa	53
Figura	3.8:	Metodología para evaluar la migración del cadmio	54
Figura	4.1:	Peso volumétrico de la mezcla con un contenido de 5 % de adsorbentes naturales a diferentes humedades	56
Figura	4.2:	Peso volumétrico de la mezcla con un contenido de 7.5 % de adsorbentes naturales a diferentes humedades	57
Figura	4.3:	Peso volumétrico de la mezcla con un contenido de 10 % de adsorbentes naturales a diferentes humedades	57
Figura	4.4:	Peso volumétrico de la mezcla con un contenido de 15 % de adsorbentes naturales a diferentes humedades	57
Figura	4.5:	Humedad óptima para la diferentes mezclas	58
Figura	4.6:	Peso volumétrico seco para las diferentes mezclas	58
Figura	4.7:	Variación de la permeabilidad con el tiempo para la mezcla compactada con un contenido de 5 % de adsorbentes naturales	59
Figura	4.8:	Variación de la permeabilidad con el tiempo para la mezcla compactada con un contenido de 7.5 % de adsorbentes naturales	60
Figura	4.9:	Variación de la permeabilidad con el tiempo para la mezcla compactada con un contenido de 10 % de adsorbentes naturales	60
Figura	4.10:	Permeabilidad para las distintas cantidades de mezcla	61
Figura	4.11:	Gasto en columnas de acrílico a diferentes tiempos 1ª prueba	62
Figura	4.12:	Gasto en columnas de acrílico a diferentes tiempos 2ª prueba	63
Figura	4.13:	Gasto en columnas de acrílico a diferentes tiempos 3ª prueba	63

TESIS CON
 FALTA DE ORIGEN

Figura 4.14:	Gasto en columnas de jeringa a diferentes tiempos 1ª prueba	64
Figura 4.15:	Gasto en columnas de jeringa a diferentes tiempos 2ª prueba	64
Figura 4.16:	Gasto en columnas de jeringa a diferentes tiempos 3ª prueba	65
Figura 4.17:	Transporte del cloruro de sodio con pulso, con un contenido de 10 % de adsorbentes naturales	66
Figura 4.18:	Transporte del cloruro de sodio en suelo saturado con un contenido de 10 % de adsorbentes naturales	67
Figura 4.19:	Desorción de cadmio con 10 % de adsorbentes naturales "carbón activado y bentonita cálcica"	68
Figura 4.20:	Desorción de cadmio con 5 % de adsorbentes naturales "carbón activado y bentonita cálcica"	69
Figura 4.21:	Desorción de cadmio sin adsorbentes naturales	69
Figura 4.22:	Desorción de cadmio con 5 % de carbón activado	70
Figura 4.23:	Desorción de cadmio con 5 % de bentonita cálcica"	71
Figura 4.24:	Sistema de encapsulación	72
Figura 4.25:	Escenario de la construcción de una capa sellada	73
Figura 4.26:	Costos para la construcción de la capa sellada	76

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Sitios abandonados e ilegales con residuos peligrosos	4
Tabla 2.1: Propiedades del cadmio	8
Tabla 2.2: Productos y técnicas de impermeabilización	32
Tabla 2.3: Requisitos de diseño para construcción de una capa sellada	35
Tabla 3.1: Sistema unificado de clasificación de suelos "ASTM D2488-1993"	39
Tabla 3.2: Cantidades de los suelos y los adsorbentes naturales	40
Tabla 3.3: Cantidad de cada material utilizados en la mezcla en [%]	41
Tabla 3.4: Cantidades de cada material utilizados en la mezcla en [g]	41
Tabla 3.5: Constante de conductividad hidráulica para diferentes tipos de suelos	47
Tabla 3.6: Resumen de los parámetros de la primera alternativa	51
Tabla 3.7: Resumen de los parámetros de la segunda alternativa	53
Tabla 4.1: Humedad óptima y peso volumétrico seco	59
Tabla 4.2: Permeabilidad en cada mezcla	61
Tabla 4.3: Porcentaje adsorbido	70
Tabla 4.4: Porcentaje adsorbido	71
Tabla 4.5: Costos específicos para la construcción de la capa sellada	75

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

SUMMARY

The cadmium is a natural element in the terrestrial bark that is usually in low concentrations, but however their use for the man's activities and the poured inadequate on the soil he has made that, in some occasions when mixing with other materials becomes a toxic product, what represents a severe risk of contamination to the soil and the underground waters.

The cadmium is employed in the industry and the consumer's products like: alloys of strong welding, systems antifire, piles nickel-cadmium, cable of electric power transmission, matches of TV, base of pigmentations used in ceramic glaze, machinery enamels, fungicides, photographs and lithographs, electrodes for lamps of vapor of cadmium, and photoelectric cells.

Considering the above-mentioned, the objective of the present investigation is to clean up a soil contaminated by cadmium by means of immobilization technologies with natural adsorbents (calcic bentonite and activated coal), to transform them into a cleaned up soil that can be reused as material of construction of a layer sealed in a landfill.

The investigation work was developed in an experimental way in laboratories of: Mechanics of Soils and Hydrogeochemistry. In the phase of mechanics of soils they were carried out compactación tests and permeability, with the objective of determining the good humidity and the permeability coefficient in the soil with different quantities of natural adsorbents (calcic bentonite and activated coal).

In the hydrogeochemistry phase soil columns were built with the objective of; to study the desorption of the cadmium low conditions of continuous flow and in this way their immobilization was determined by the addition of natural adsorbents (calcic bentonite and activated coal).

The results obtained at experimental level demonstrated that, for the addition of natural adsorbents (calcic bentonite and activated coal), the cadmium can be immobilized until in 79 %, effect that the soil for if it is not only able to carry out, for what you can summarize that the immobilization, is a factor that can diminish the infiltration risks from the cadmium to the underground waters and of this way to reduce its pollution.

INSTITUTO
FALLA DE ORIGEN

RESUMEN

El cadmio es un elemento natural en la corteza terrestre que normalmente se encuentra en bajas concentraciones, más sin embargo su uso por las actividades del hombre y el vertido inadecuado sobre el suelo ha hecho que, en algunas ocasiones al mezclarse con otros materiales se convierta en un producto tóxico; lo que representa un severo riesgo de contaminación al suelo y a las aguas subterráneas.

El cadmio es empleado en la industria y productos del consumidor como: aleaciones de soldadura fuerte, sistemas antifuego, pilas níquel-cadmio, cable de transmisión de energía eléctrica, fósforos de TV, base de pigmentaciones utilizadas en vidrioado de cerámica, esmaltes de maquinaria, funguicidas, fotografía y litografía, rectificadores de selenio, electrodos para lámparas de vapor de cadmio, y células fotoeléctricas.

Considerando lo anterior, el objetivo de la presente investigación es sanear un suelo contaminado por cadmio mediante tecnologías de inmovilización con adsorbentes naturales (bentonita cálcica y carbón activado), para convertirlos en un suelo saneado que se pueda reusar como material de construcción de una capa sellada en un relleno sanitario.

El trabajo de investigación se desarrolló de manera experimental en laboratorios de: Mecánica de Suelos e Hidrogeoquímica. En la fase de mecánica de suelos se realizaron pruebas de compactación y permeabilidad, con el objetivo de determinar la humedad óptima y el coeficiente de permeabilidad en el suelo con diferentes cantidades de adsorbentes naturales (bentonita cálcica y carbón activado).

En la fase de hidrogeoquímica se construyeron columnas de suelo con el objetivo de; estudiar la desorción del cadmio bajo condiciones de flujo continuo y de ésta manera se determinó su inmovilización por la adición de adsorbentes naturales (bentonita cálcica y carbón activado).

Los resultados obtenidos a nivel experimental demostraron que, por la adición de adsorbentes naturales (bentonita cálcica y carbón activado), el cadmio puede ser inmovilizado hasta en un 79 %, efecto que el suelo por si sólo no es capaz de realizar, por lo que se puede resumir que la inmovilización, es un factor que puede disminuir los riesgos de infiltración del cadmio a las aguas subterráneas y de ésta manera reducir su contaminación.

RESERVA
CON
FALLA DE ORIGEN

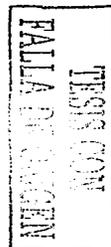
1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad los problemas de contaminación de suelos y aguas subterráneas a gran escala, son consecuencia directa del desarrollo de nuestra moderna sociedad industrializada. La producción de residuos en su mayoría, está relacionada con todos los aspectos de la vida. Las industrias transformadoras de materias primas precisan de la extracción y el procesamiento de recursos naturales, como los minerales, los productos forestales y el petróleo. La extracción y el tratamiento de recursos, en general, dan lugar a la producción de grandes cantidades de materiales residuales. Las principales fuentes de contaminación de aguas subterráneas se pueden agrupar en los siguientes tipos: a) Desechos sólidos sobre la superficie del terreno, que se infiltran en solución o suspensión con el agua de lluvia; b) Fugas de agua contaminada, que posteriormente, se infiltra; c) Inyección a los acuíferos de aguas contaminadas, como por ejemplo, los pozos de recarga o pozos para eliminar desechos industriales; d) Incorporación de contaminantes naturales al agua del acuífero, ya que a medida que el agua pasa a través de una formación geológica los contaminantes son incorporados; e) Infiltración de agua de riego contaminada con agroquímicos; f) Desprendimiento de contaminantes de desechos enterrados (radiactivos, productos químicos, letrinas, fosas sépticas, etc.); g) Invasión de un acuífero ya contaminado a una zona ya contaminada, debido a cambios en la dirección y velocidad de flujo, generalmente producidos por sobreexplotación de los acuíferos (Eweis et al, 1999).

Los suelos y aguas subterráneas contaminados pueden ser saneados mediante la aplicación de determinados métodos físicos, químicos y biológicos, siendo un factor principal entre las diferentes opciones para la eliminación de residuos, el costo que estos representan. Una alternativa para la descontaminación, de estas matrices es el no permitir el contacto de los sólidos contaminantes con el medio ambiente, interrumpiendo los caminos de exposición (la encapsulación del suelo contaminado por construcciones físicas por tablestacas, pantallas o capas selladas) (Kleinken, 1997).

Otro tratamiento de sólidos contaminados es la inmovilización de los contaminantes en el mismo suelo para no permitir su difusión al ambiente. El suelo se vitrifica o se mezcla con reactivos como hidróxidos, sulfatos, fosfatos, parafinas, alcoholes y ácidos grasos para inmovilizar los contaminantes orgánicos e inorgánicos por adsorción, precipitación, complejación, oxidación, reducción, polimerización o condensación. Otras estrategias para la inmovilización de contaminantes incluyen, aparte de la adición de reactivos, la solidificación del suelo por inyección de concreto, cal, yeso o asfaltos (Bolsing, 1995; Faschan, et al. 1994; Grathwohl y Einsele, 1993; Kruse, 1997; Kuhnert, et al; 1993, TAUW Umwelt, GMBH, 1996).

El objetivo del presente trabajo, es desarrollar una tecnología basada en la utilización de adsorbentes naturales, que permitan la inmovilización del cadmio en suelos para convertirlos en sólidos saneados que sean ecológicamente inertes y puedan reutilizarse como material de construcción, como por ejemplo, para la construcción de capas selladas compactadas en rellenos sanitarios.



El trabajo se desarrolló con una investigación bibliográfica y experimental en laboratorios de Mecánica de Suelos e Hidrogeoquímica.

En la fase de mecánica de suelos se realizaron pruebas de compactación y permeabilidad, con el objetivo de determinar la humedad óptima y el coeficiente de permeabilidad en el suelo con distintas cantidades de adsorbentes naturales (bentonita cálcica y carbón activado).

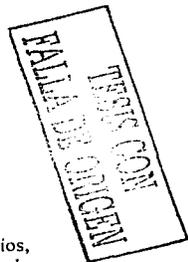
En la fase de hidrogeoquímica se construyeron columnas de suelos con el objetivo de estudiar la desorción del cadmio bajo condiciones de flujo continuo y de ésta manera se determinó su inmovilización por la adición de adsorbentes naturales (bentonita cálcica y carbón activado).

1.1 Problemática de la contaminación de suelos en México

Durante años, la disposición irresponsable e inadecuada de residuos peligrosos en múltiples lugares sin control, ha ocasionado un grave problema de contaminación de suelos. La Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), actualmente cuenta con criterios de restauración involucrados en emergencias ambientales debido a la contaminación de suelos en México. Las sustancias principalmente involucradas en emergencias de contingencias ambientales son, en orden de ocurrencia (Calderón, 1999).

- | | |
|--------------------------------|-------------------|
| 1. Petróleo crudo | 11. Mercurio |
| 2. Gasolina nova | 12. Cadmio |
| 3. Gasolina Magna | 13. Níquel |
| 4. Combustóleo | 14. Bario |
| 5. Diesel | 15. Disolventes |
| 6. Ácido sulfúrico | 16. Acrilamida |
| 7. Tolueno | 17. Cianuro |
| 8. Cromo total | 18. Acrilonitrilo |
| 9. Plomo orgánico e inorgánico | 19. Tolueno |
| 10. Arsénico | |

Los lugares donde mas frecuentemente son depositados estos residuos son terrenos baldíos, patios traseros de las industrias, tiraderos municipales, barrancas, derecho de vía de carreteras, drenajes municipales y cuerpos de agua, lo cual provoca también el deterioro del aire y del agua superficial y subterránea como consecuencia de la migración de los contaminantes desde el suelo hacia éstos medios. Otro factor de contaminación es el vertido de basura municipal que en muchas ocasiones no reciben un tratamiento adecuado generando lixiviados que se infiltran y contaminan las aguas subterráneas.



PAGINACIÓN DISCONTINUA

1.2 Formas de contaminación

Las prácticas mas comunes empleadas durante décadas para disponer de los residuos químicos industriales, consisten en colocarlos en tanques y enterrarlos, abandonar los residuos en tanques y contenedores, vertirlos directamente en el suelo o disponerlos en cuerpos de agua, produciendo contaminación en los suelos, debido a que los tanques y contenedores se corroen desarrollándose fugas al ambiente. Otras formas de contaminación son los tanques de almacenamiento subterráneo con fugas, lixiviación de pilas de materiales, conductos desgastados o rotos y accidentes que involucran derrames de sustancias químicas.

Los problemas relacionados con la contaminación del suelo recientemente han adquirido mayor relevancia porque ha surgido mayor conocimiento del riesgo potencial que representa para la salud pública y el ambiente, así como por el tamaño del problema y del costo que implica su restauración. Algunos de los contaminantes más comunes en el suelo son los hidrocarburos de petróleo derramados o depositados durante las operaciones de extracción, refinación, transferencia y comercialización de estos productos, razón por la cual frecuentemente se encuentran suelos contaminados con petróleo, combustóleo, gasolinas, diesel y turbosina. Otra forma común de contaminación del suelo es por compuestos orgánicos volátiles (COV's), debido a que la mayoría de los procesos de manufactura, desde las industrias de tecnología avanzada hasta los talleres de reparación y establecimiento de limpieza en seco, utilizan algún tipo de disolvente halogenado, en especial clorado, con propósitos de lavado o desengrasado. La disposición de compuestos inorgánicos en los suelos, es otro caso de contaminación por desechos peligrosos y actividades específicas como la minería y el recubrimiento de metales. Los problemas de contaminación de los suelos en su mayoría ocurren por descuido, negligencia o falta de conciencia y el problema aumenta debido a la creciente industrialización y al uso de sustancias químicas y materiales cuya estructura química es cada vez más compleja. Actualmente son pocos los países que reconocen y estudian la contaminación del suelo como lo hacen con la contaminación del aire o del agua. Sin embargo, debe reconocerse que aunque se ha puesto énfasis en establecer medidas preventivas y reguladoras con el fin de reducir o eliminar la descarga y disposición de materiales y residuos potencialmente peligrosos a la salud y al ambiente, debe evaluarse y dar tratamiento a la contaminación ya existente, y a la que continuará presentándose, para evitar que se siga contaminando en la misma proporción, ya que para su restauración se requieren técnicas complejas y costosas (Eweis et al, 1999).

1.3 Sitios contaminados con desechos peligrosos

En México una gran parte de los sitios contaminados (Tabla 1.1) es producto del resultado de la descarga ilegal de desechos peligrosos en suelos no protegidos, donde no se han tomado medidas adecuadas para impedir daños a la salud y al medio ambiente debido a la exposición de sustancias tóxicas. Esto indica el grave problema por las amenazas existentes a la salud humana y al medio ambiente, así como para evaluar los riesgos derivados en los lugares contaminados y establecer prioridades de descontaminación y limpieza (Semarnap/PROFEP, 1998).

TRABAJOS CON
MATERIALES DE ORIGEN

**Tabla 1.1: Sitios abandonados e ilegales con residuos peligrosos,
(Semarnap/PROFEPA, 1998)**

Estado	No. de sitios	Principales residuos
Baja California Norte	8	Disolventes, metales pesados, polvo de fundición, aceites
Baja California Sur	2	Jales, escoria de fundición
Campeche	4	Aceite quemado, residuos biológicos - infecciosos de perforación
Chiapas	17	Plaguicidas, hidrocarburos, residuos hospitalarios, solventes
Chihuahua	13	Hidrocarburos, compuestos químicos, aceites gastados
Coahuila	15	Metales pesados, jales, aceite residual, hidrocarburos, biológico-infecciosos, compuestos químicos
Durango	3	Hidrocarburos, insecticidas
México	10	Escorias de fundición, biológico-infecciosos, compuestos químicos, lubricantes gastados
Guanajuato	10	Aceites, metales pesados, organoclorados, lodos, escorias de fundición, aceites gastados.
Hidalgo	6	Escorias de fundición, natas de pintura
Jalisco	7	Tierras de blanqueo, tetracloroetileno, lodos, residuos de baterías, tierra contaminada con diesel y combustible.
Morelos	1	Tambores metálicos vacíos y llenos sin identificación
Nayarit	5	Residuos hospitalarios, jales, hidrocarburos
Nuevo León	22	Escoria de fundición, aluminio, plomo, cadmio, níquel, aceite, cianuros, hidrocarburos
Oaxaca	1	Industriales peligrosos
San Luis Potosí	10	Residuos hospitalarios, asbesto, escoria de fundición, níquel, lodos, botes de pintura
Sinaloa	4	Envases de agroquímicos
Tamaulipas	8	Escoria de fundición, aceites, arena sílica, fenoles, compuestos químicos, recipientes vacíos
Zacatecas	9	Jales, metales pesados, reactivos químicos
Total	155	

TERCER CON
 FALTA DE ORIGEN

1.4 Justificación

Actualmente existen tecnologías de saneamiento de suelos y sedimentos contaminados. Sin embargo, su aplicación y mantenimiento requieren de grandes inversiones, las cuales a menudo no se encuentran disponibles, especialmente en países en vías de desarrollo como lo es México. Por otro lado, existen diversas técnicas de descontaminación que resuelven el problema, ya sea por procesos físicos, químicos ó biológicos. El producto de este tipo de tratamiento es un suelo limpio, que se puede reusar de cualquier forma, siendo una de las ventajas de estas tecnologías. Entre las desventajas que se tienen, se encuentran los costos del tratamiento que a menudo impiden su aplicación por razones económicas, las limitaciones en la aplicación tiene que ver con las características del suelo del sitio y de los contaminantes (Afferden, 1999). En la actualidad abundan contaminantes que no son fáciles de sanear como metales pesados y mezclas de estos con sustancias orgánicas. En México se han localizado alrededor de 155 sitios ilegales con residuos peligrosos (Semarnap/PROFEPA, 1998), por lo que existe una gran demanda de tecnologías de saneamiento que sean seguras de acuerdo a la protección del ambiente, además de ser económicas para su aplicación.

Una alternativa de solución, la representan las tecnologías de inmovilización mediante el uso de adsorbentes naturales como la bentonita cálcica y el carbón activado, que son de gran abundancia en el mercado. El desarrollo de esta tecnología se justifica en la aplicación de nuevas técnicas capaces de proporcionar equilibrio en el medio ambiente. Además de ser factibles económicamente.

1.5 Hipótesis

- La mezcla de adsorbentes naturales (bentonita cálcica y carbón activado) pueden inmovilizar contaminantes lixiviables en suelos, los cuales pueden reutilizarse como capa sellada después de haber sido saneados, además de que esta tecnología es factible desde un punto de vista económico.

1.6 Objetivo general

- Rehabilitar algunos suelos contaminados mediante tecnologías de inmovilización de contaminantes por la adición de adsorbentes naturales, y posteriormente darles una aplicación como sellada.

1.6.1 Objetivos específicos

Mecánica de suelos

- Preparar la mezcla de la arena, grava, carbón activado y bentonita cálcica.
- Obtener la humedad óptima para las distintas cantidades de la mezcla.
- Obtener la constante de conductividad hidráulica (k).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

- Disminuir la conductividad hidráulica del suelo a valores establecidos en normas nacionales e internacionales para la construcción una capa mineral (NOM-084-ECOL-1994, U.S. EPA/530-SW-86-031, 1986 y TA-Siedlungsabfall, 1993).
- Adaptar la compactación a las necesidades del experimento en el sistema de columnas de hidrogeoquímica.

Hidrogeoquímica

- Desarrollar una metodología para el estudio de desorción del contaminante.
- Probar que la inmovilización funciona bajo condiciones de flujo continuo.

1.7 Alcances y limitaciones

El trabajo esta enfocado a tratar un suelo contaminado por cadmio de forma experimental a nivel laboratorio en pequeños volúmenes, no se contempla un saneamiento con grandes volúmenes; no se pretende implementar un plan piloto para definir un proceso constructivo a gran escala por limitación de tiempo y recursos para llevar a cabo dicha investigación. El análisis de costos es para un escenario típico de aplicación de la tecnología de inmovilización, los costos pueden variar para cada caso particular dependiendo de las características del sitio a tratar.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Contaminación por metales pesados

En el suelo existen elementos que se encuentran en concentraciones bajas, que con las actividades del hombre, se han incrementando y, que con el paso del tiempo, se han vuelto contaminantes. Dentro de este grupo de elementos predominan los metales pesados. Los elementos que resultan altamente tóxicos y presentan la propiedad de acumularse en los organismos vivos son, principalmente: Cd, Hg, Pb, Cu, Ni, Zn, Sb, Bi (García y Dorronsoro, 2001).

El contenido de metales pesados en los suelos, debería ser únicamente función de la composición del material original y de los procesos edafogénicos que dan lugar al suelo. Sin embargo, la actividad humana ha incrementado el contenido de los metales en el suelo, siendo ésta, la causa más frecuente de las concentraciones tóxicas procedentes de los vertidos industriales, de las actividades mineras, de la aplicación de plaguicidas o también del tráfico vial. Como resultado, de esto son emitidos grandes cantidades de partículas que, después de un cierto tiempo de permanencia en la atmósfera precipitan en los suelos lejos del lugar donde han sido vertidos. Los metales pesados son muy estables en el suelo y en el proceso natural de transformación de las rocas para originar a los suelos, suelen concentrarse sin rebasar los umbrales de toxicidad y además los metales pesados presentes en las rocas, se encuentran bajo formas muy poco asimilables para los organismos. Los metales pesados más abundantes en los suelos son: el Mn, Cr, Zn, Ni, y Pb (1-1.500 mg/kg); el manganeso puede llegar a 10.000 kg/kg. En menores concentraciones se encuentran el Co, Cu y As (0.2-250 mg/kg) y con mínimos porcentajes el Cd y Hg (0.01mg/kg).

2.2 Dinámica de los metales pesados en el suelo

Los metales pesados en el suelo pueden seguir cuatro diferentes vías; las cuales se citan a continuación:

1. Pueden quedar retenidos en el suelo, ya sea disueltos en la solución del suelo o bien fijados por procesos de adsorción, complejación y precipitación.
2. Pueden ser absorbidos por las plantas y así incorporarse a las cadenas tróficas.
3. Pueden pasar a la atmósfera por volatilización.
4. En la Figura 2.1 se presenta como los metales pesados pueden movilizarse hacia las aguas superficiales o subterráneas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

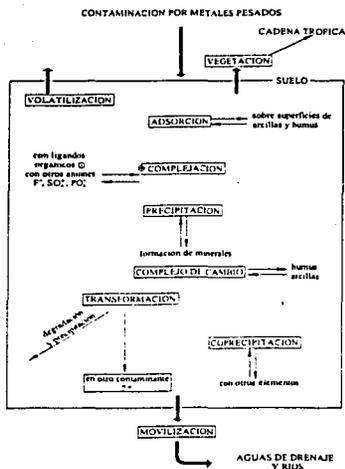


Figura 2.1: Dinámica de los metales pesados en suelos (Calvo Anta, 1996)

2.3 Descripción del cadmio

El cadmio es un elemento natural en la corteza terrestre. Normalmente, se encuentra como un mineral combinado con otros elementos como el oxígeno (el óxido del cadmio), el cloro (cloruro del cadmio), o el azufre (el sulfato del cadmio, sulfito del cadmio). No tiene un sabor u olor definido. El cadmio no se corroe fácilmente y tiene muchos usos. En la industria y productos del consumidor, se usa para las baterías, pigmentos, capas de metal, y plásticos. Las propiedades del cadmio son descritas en la tabla 2.1.

Tabla 2.1: Propiedades del cadmio (Tabla periódica, 2001)

Descripción			
Nombre	Cadmio	Símbolo	Cd
Número atómico	48	Peso atómico	112.40
Propiedades electrónicas		Propiedades físicas	
Valencia	2	Densidad (g/ml)	8.65
Electronegatividad	1.7	Punto de ebullición °C	765
Radio covalente	1.48	Punto de fusión °C	320.9
Potencial primero de ionización (eV)	9.03	Volumen atómico (cm ³ /mol)	13
Número de oxidación	+1 (raro), -2	Estructura cristalina	Hexagonal

FALLA RE CORRIEN
 TESIS CON

2.3.1 Principales usos del cadmio

Entre los principales usos industriales del cadmio se citan los siguientes: Como recubrimientos electrodepositados y de inmersión sobre metales, en aleaciones antifricción y de bajo punto de fusión, en aleaciones de soldadura fuerte, en sistemas antifuego, en pilas níquel-cadmio, en cables de transmisión de energía eléctrica, en fósforos de TV, en base de pigmentaciones utilizadas en vidrioado de cerámica, en esmaltes de maquinaria, en funguicidas, en fotografía y litografía, en rectificadores de selenio, en electrodos para lámparas de vapor de cadmio, y en células fotoeléctricas (SASySH, 2001).

2.3.2 Efectos del cadmio en la salud

El contacto superficial con el cadmio se desconoce, ya que puede causar efectos en la salud de humanos o animales. La principal fuente de intoxicación crónica es la ingestión de plantas que han sido contaminadas con polvo industrial que contienen cadmio. La intoxicación a través de la inhalación en el aire es muy rara. La tasa de absorción intestinal de éste elemento es baja y por consecuencia la excreción es muy lenta. Por otro lado la acumulación del cadmio produce envenenamiento lento.

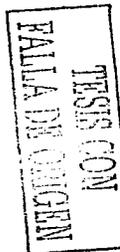
En general, la ingestión oral de cadmio causa envenenamiento crónico, aunque una dosis oral pequeña de 5 a 10 mg/kg de peso de cuerpo llega a ser letal. Concentraciones de más de 30 a 60 mg/kg de cadmio producen envenenamiento y muerte. Concentraciones de 25 mg/kg de alimento, causan desórdenes en el metabolismo después de seis meses. Una concentración de más de 0.01 mg de cadmio por litro de agua es tóxica para peces y la mortalidad ocurre a niveles arriba de 10 mg/L. Desórdenes de la actividad enzimática ocurren alrededor de 0.1 mg/kg. La ingestión de una cantidad relativamente alta de cadmio (5 mg/kg de peso de cuerpo) causa irritación en la mucosa gástrica seguida de vómito. Dosis pequeñas a largo plazo resultan en síntomas de deficiencia de zinc, cobre y hierro (Albert, 1998).

Actualmente se ha puesto más atención al metabolismo de este elemento ya que sus concentraciones en el ambiente han aumentado y por lo tanto puede tener efectos adversos sobre el ser humano. Además su estructura atómica se parece a la del zinc, lo que permite que lo sustituya en algunas enzimas, inhibiéndose la acción enzimática correspondiente.

La ingestión de alimentos o bebidas contaminadas con cadmio puede causar trastornos agudos de tipo gastrointestinal. Los síntomas incluyen náuseas, salivación, vómito, dolor abdominal tipo cólico y dolor de cabeza. En casos más severos se puede presentar diarrea y shock (Albert, 1988).

2.4 Clasificación de las tecnologías de saneamiento

Las tecnologías de saneamiento de suelos contaminados se clasifican en los siguientes tres tipos de sistemas de acuerdo con su forma de operación o aplicación (Sims, 1990):



1. Técnicas in-situ: el suelo contaminado se trata en el lugar donde se encuentra, sin moverlo.
2. Técnicas on-site: el suelo contaminado se mueve físicamente de su lugar original y puede:
 - a) Colocarse en un área preparada, la cual ha sido diseñada para mejorar el tratamiento y/o prevenir el transporte de contaminantes a partir del sitio.
 - b) Llevarse a un área de almacenamiento mientras se prepara el sitio original para poder usarse y después colocar el suelo removido para su tratamiento. La preparación del lecho puede consistir en colocar una capa de arcilla o una membrana plástica para retardar el transporte de contaminantes, o en la adición de suelo sin contaminar o en algún aditivo para proporcionar un medio de tratamiento adicional.
 - c) Tratarse en una planta móvil llevada al sitio.
3. Técnicas off-site: el suelo contaminado se remueve completamente del sitio y se transporta a una planta de tratamiento en otra parte, generalmente el suelo se vuelve a poner en el sitio después de tratarlo.

Las tecnologías y procesos de tratamiento para suelos contaminados de acuerdo con su principio de operación se clasifican en las siguientes categorías (Asante-Duah, 1996):

- Tratamientos físicos

Algunos constituyentes químicos presentes en los sitios contaminados se pueden tratar por procesos de separación y purificación, que consisten en técnicas tales como: filtración, centrifugación, flotación, destilación, evaporación, extracción con disolventes, ósmosis inversa, adsorción con carbón activado, decantación e inmovilización de constituyentes por solidificación (Asante-Duah, 1996).

Este tipo de técnicas generalmente no alteran la composición química de los contaminantes, sólo separan o concentran los materiales tratados aprovechando las diferencias en las características físicas tales como densidad, presión de vapor y tamaño de partícula. Los procesos físicos rara vez se usan como la opción de tratamiento final para cualquier material contaminado. En general, los objetivos de muchos de estos métodos son:

1. Separar los materiales peligrosos de aquellos que se consideran menos peligrosos.
2. Separar diferentes tipos de materiales peligrosos en varias corrientes que requieren diferentes métodos de tratamiento.
3. Pretratar un material contaminado antes de su disposición final.

- Tratamientos químicos

Algunos compuestos químicos o materiales contaminados se pueden separar o transformar en menos peligrosos, mediante tratamientos químicos. Estos procesos involucran el uso de



reacciones químicas para transformar los compuestos peligrosos en sustancias menos tóxicas. Estas técnicas son: precipitación, neutralización, hidrólisis, fotólisis, oxidación-reducción y deshalogenación (Asante-Duah, 1996).

▪ **Tratamientos biológicos**

Son procesos en los cuales se usan microorganismos naturales desarrollados para degradar los compuestos químicos presentes en el suelo. Los procesos biológicos pueden transformar materiales tóxicos en elementos no tóxicos tales como agua, bióxido de carbono y otros productos inocuos. El tratamiento biológico es altamente sensible a cambios en la composición orgánica y las concentraciones del material que se está tratando, generalmente no tiene efecto sobre sustancias inorgánicas disueltas, inclusive niveles significativos de algunos compuestos químicos inorgánicos llegan a inhibir la actividad biológica o hasta matar a los microorganismos (Asante-Duah, 1996).

▪ **Tratamientos térmicos**

Las tecnologías de tratamientos térmicos emplean calor para destruir o transformar los contaminantes de interés. Este tipo de procesos a través del control de la temperatura y de la disponibilidad de oxígeno convierte los materiales peligrosos en dióxido de carbono, agua y otros productos de combustión. La degradación térmica es aplicable a materiales contaminados que contienen concentraciones significativas de compuestos orgánicos y se puede realizar a través de diferentes tipos de incineración o pirólisis.

Dependiendo del tipo de material contaminado que se está tratando, resultan diferentes productos finales. La degradación térmica de compuestos orgánicos produce principalmente como subproductos agua, nitrógeno, oxígeno, bióxido de carbono, gases ácidos y partículas. Si están presentes metales una parte de estos puede emitirse a la atmósfera. También existe la posibilidad de formar y liberar productos de combustión incompleta (Asante-Duah, 1996).

2.5 Tecnologías de saneamiento para suelos

Actualmente se desarrollan técnicas para saneamiento de suelos potencialmente más efectivas. En general estas técnicas son:

De contención

▪ **Física**

- a) Con cubierta: es una forma de evitar la contaminación o reducirla a niveles permisibles, consiste en confinar la fuente contaminante mediante recubrimientos y cubiertas. Se utilizan generalmente dos tipos de solución para la construcción de recubrimientos y cubiertas: 1) Capas de suelos, y 2) Capas de suelos y geosintéticos.
- b) De barreras verticales: hay barreras verticales, coberteras superficiales, barreras horizontales, y combinaciones de ellas. La configuración va de barreras verticales simples, coberteras o muros que rodean la zona contaminada. La configuración

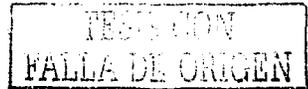
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

depende de la movilidad del contaminante, agua de precolación, velocidad y dirección del flujo de agua. Las barreras verticales pueden llegar a 70 metros de altura o profundidad excepto sobre rocas duras.

- c) Con revestimientos; es un sistema que funciona como una técnica de impermeabilización que emplea productos o revestimientos a base de: 1) Selladores naturales y tratamientos químicos, 2) Revestimientos rígidos, y 3) Revestimientos flexibles (Kays, 1997).
- Hidráulica
 - a) Mediante contención de la pluma de contaminante; es una técnica empleada para mitigar la difusión y dispersión del contaminante hacia las áreas contiguas construyendo un sistema de protección que obstruya el paso del contaminante.
 - b) Manejo en el gradiente hidráulico; esta basado en medidas del gradiente hidráulico y la conductividad hidráulica del suelo. Esta técnica calculan en flujo del contaminante entre dos puntos del suelo mediante el producto del gradiente de potencial hidráulico por la conductividad hidráulica media del suelo entre los dos puntos. Este método se puede aplicar a perfiles de suelo estratificado y no requiere establecer condiciones de contorno en la superficie del suelo ni en su capa inferior.

Tratamiento

- Incineración
- Estabilización/solidificación
- Vitrificación
- Biorremediación
- Lavado de suelo
- Extracción con vapor
- Encapsulación
- Desorción térmica
- Tratamientos químicos



A continuación se presenta la descripción de las principales tecnologías de saneamiento de suelos contaminados que actualmente están en uso a escala comercial (HWRSM, 1994; Asante-Duah, 1996; Sims, 1990; EPA 540/R-94/043, 1994; Nelson, N, et al, Long, 1993; Suthersan, 1997).

2.5.1 Incineración

Es un proceso térmico por medio del cual los materiales contaminados se exponen al calor excesivo en algún tipo de incinerador, que en el caso de los suelos es un horno rotatorio o de lecho fluidizado. Involucra la destrucción térmica de los contaminantes por calentamiento. Dependiendo de la intensidad del calor los contaminantes se evaporan y/o se destruyen; las temperaturas de operación varían entre los 870°C a 1370°C. Los compuestos tóxicos se reducen a elementos básicos como hidrógeno, carbono, cloro, nitrógeno, etc. los cuales se combinan con el oxígeno para formar sustancias no tóxicas tales como agua.

bióxido de carbono, óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x), también se producen cenizas inertes, materia orgánica particulada, ácido clorhídrico, pequeñas concentraciones de materiales orgánicos y óxidos metálicos. Generalmente se obtiene una eficiencia de destrucción del 99.99 %. Las cenizas generadas pueden disponerse en rellenos sanitarios (HWRSM, 1994; Asante-Duah, 1996; Sims, 1990; EPA 540/R-94/043, 1994; Nelson, N, et al, Long, 1993; Suthersan, 1997).

Ventajas:

- Destrucción de todos los compuestos orgánicos
- Proporciona solución permanente por destrucción total de los contaminantes
- Reducción del volumen de contaminantes

Desventajas:

- Requiere excavación del suelo para su tratamiento
- Requiere control de la contaminación del aire
- Posibilidad de formación de dioxinas si se incinera material clorado
- Costo relativamente alto y requiere instalación a gran escala de equipo e instalaciones portátiles
- La tecnología no es apta para remover contaminantes inorgánicos

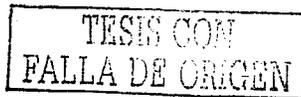
Parámetros de caracterización:

Físicos:

- Contenido de humedad
- Contenido de cenizas
- Temperatura de fusión de las cenizas

Químicos:

- Compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles
- Principales compuestos orgánicos peligrosos
- Cloro total
- Flúor
- Azufre total
- Nitrógeno total
- Fósforo
- Bifenilos policlorados
- Dioxinas
- Metales (Hg, Pb, Cd, Zn, Ag, Sn)



2.5.2 Estabilización/solidificación

Es una técnica para fijar o modificar químicamente los contaminantes mediante la aplicación de reactivos específicos. El proceso de fijación consiste en la inmovilización de los contaminantes previniendo la migración hacia el ambiente circundante. En este proceso el suelo o material contaminado se mezcla con reactivos y materiales solidificantes para estabilizar y/o encapsular los constituyentes químicos, produciendo un residuo inmóvil e

inactivo, convirtiendo los contaminantes en formas poco solubles, poco móviles y con una menor toxicidad. El resultado de la solidificación es un bloque monolítico de alta rigidez estructural. La solidificación indica la producción de una masa monolítica sólida, con suficiente integridad estructural como para transportarse en piezas de tamaño adecuado sin requerir de algún contenedor secundario. La estabilización se refiere a un proceso por el cual el residuo se convierte en una forma más estable químicamente. El término incluye la solidificación, pero también involucra una reacción química para transformar a un componente tóxico en una nueva sustancia o compuesto no tóxico. En esta técnica no se consideran los procesos biológicos (HWRSM, 1994; Asante-Duah, 1996; Sims, 1990; EPA 540/R-94/043, 1994; Nelson, N. et al, Long, 1993; Suthersan, 1997).

La solidificación no necesariamente involucra una interacción química entre los residuos y los agentes solidificantes, pero puede involucrar la unión mecánica dentro de los residuos del monolito. La solidificación y la estabilización están diseñadas para cumplir uno o más de los siguientes puntos:

1. Producir un sólido a partir de un residuo líquido o semisólido.
2. Reducir la solubilidad del contaminante.
3. Disminuir el área de exposición superficial a través de la cual puede ocurrir la transferencia.

La solidificación puede involucrar la encapsulación de partículas finas de residuo (microencapsulación) o de grandes bloques (macroencapsulación) de manera que se reduce el potencial de peligrosidad del material residual.

Ventajas:

- Es útil para la inmovilización de muchos compuestos orgánicos, metales, aceites, disolventes, residuos radiactivos y residuos orgánicos sólidos
- Es una tecnología probada con aplicaciones específicas

Desventajas:

- Puede ser difícil mezclar los suelos y los compuestos químicos del tratamiento
- La tecnología no es capaz de prevenir el lixiviado a bajo nivel de compuestos inorgánicos
- Se requiere un monitoreo constante a largo plazo
- Restricción del uso futuro que se le da al suelo

Parámetros empleados en la caracterización:

Parámetros físicos:

- Descripción de los materiales
- Tamaño de la partícula
- Contenido de humedad
- Densidad
- Pruebas de resistencia del material tratado

Parámetros químicos:

- pH
- Alcalinidad/acidez



- Compuestos que causan interferencia
- Pruebas de lixiviado
- Calor de hidratación

2.5.3 Vitrificación

La vitrificación es un proceso de tratamiento térmico que emplea calor para convertir el material contaminado en un producto cristalino, químicamente inerte y estable, parecido al vidrio. El proceso consiste en introducir electrodos dentro del suelo contaminado que contiene niveles significativos de silicatos. En la superficie los electrodos se conectan al suelo por medio de grafito, se aplica una corriente muy alta que pasa a través de los electrodos y el grafito, y el suelo se funde como resultado de la elevada temperatura. Es necesario atrapar los gases y vapores que escapan debido a que algunos contaminantes se evaporan. Una vez que se enfría el suelo, los contaminantes quedan químicamente enlazados por el calor dentro del vidrio formado. Las temperaturas de operación empleadas, se encuentran entre los 1600°C a 1990°C y funciona hasta 15 m de profundidad, el potencial eléctrico es de 12 KV (HWRSM, 1994; Asante-Duah, 1996; Sims, 1990; EPA 540/R-94/043, 1994; Nelson, N. et al, Long, 1993; Suthersan, 1997).

Ventajas:

- Puede destruir o inmovilizar compuestos orgánicos, inorgánicos, radiactivos, bifenilos policlorados, metales pesados
- No requiere excavación del suelo
- Minimiza la exposición de los trabajadores a los contaminantes

Desventajas:

- Es muy costoso debido al consumo de energía, por lo que se emplea sólo para residuos radiactivos o extremadamente peligrosos
- Se requiere instalación para captar las emisiones de gases de los compuestos que se evaporan
- Limitaciones del uso futuro del suelo, ya que prácticamente queda inutilizable

Parámetros empleados en la caracterización:

Parámetros físicos:

- Profundidad de la contaminación y el nivel freático
- Permeabilidad del suelo
- Contenido de escombros en los residuos presentes
- Volumen de vacíos

Parámetros químicos:

- Concentración de metales cerca de los electrodos



2.5.4 Biorremediación

Es un proceso biológico que consiste en el uso de microorganismos para degradar las sustancias peligrosas presentes en un sitio contaminado formando compuestos no tóxicos como agua, dióxido de carbono, ácidos grasos y otros productos inocuos. Es una de las tecnologías más atractivas para tratar suelos contaminados, ya que elimina las sustancias químicas presentes y ofrece una solución permanente.

La biorremediación emplea los microorganismos que existen de manera natural en el suelo tales como hongos, bacterias y levaduras o microorganismos desarrollados mediante técnicas de biotecnología. Las condiciones óptimas para llevar a cabo la transformación biológica se obtienen manipulando el ambiente físico y controlando el suministro de nutrimentos. Esta técnica se puede emplear para tratar la contaminación presente en los primeros 15 a 30 cm del suelo, mediante labranza para proporcionar aireación y adición de nutrimentos y agua para estimular el crecimiento de los microorganismos. El tratamiento de la contaminación a profundidades superiores a los 12 m generalmente requiere la instalación de pozos de inyección para suministrar nutrimentos y oxígeno. La biodegradación de compuestos en condiciones de campo depende de la temperatura, el tipo de compuestos a degradar, niveles de oxígeno disuelto, contenido de humedad del suelo, permeabilidad, potencial de oxidación-reducción, pH, disponibilidad y concentración de los contaminantes, disponibilidad de nutrimentos y de la comunidad microbiológica natural (HWRSM, 1994; Asante-Duah, 1996; Sims, 1990; EPA 540/R-94/043, 1994; Nelson, N, et al, Long, 1993; Suthersan, 1997). Algunas de las razones por la cual no funciona esta técnica son las siguientes:

1. La concentración de las sustancias químicas, puede ser tan alta que resulta tóxica para los microorganismos
2. Las condiciones del suelo pueden ser demasiado ácidas o alcalinas
3. Puede haber falta de nutrimentos que se necesitan para usar las sustancias químicas como fuente de alimentos (nitrógeno, fósforo, potasio, azufre o elementos traza)
4. Condiciones de humedad desfavorables
5. Falta de oxígeno, nitrato o sulfato necesarios para usar los compuestos químicos como fuente de energía

Ventajas de esta técnica:

- Aplicable a muchos compuestos orgánicos
- No requiere excavación del suelo
- Proporciona solución permanente
- Puede emplearse sobre acuíferos de roca permeable

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Desventajas de esta técnica:

- No es efectivo en suelos de baja permeabilidad
- En ocasiones se requiere mucho tiempo para lograr la degradación completa de los contaminantes
- Puede ser altamente selectiva respecto a los compuestos a degradar
- Requiere mantenimiento continuo

Parámetros de caracterización:

Parámetros físicos:

- Contenido de humedad del suelo
- Capacidad de campo del suelo
- pH
- Temperatura
- Disponibilidad de oxígeno
- Permeabilidad del suelo

Parámetros químicos:

- Carbono orgánico total
- Potencial redox
- Relación carbono:nitrógeno:fósforo

Parámetros biológicos:

- Pruebas de incubación de suelo
- Pruebas con respirómetro electrolítico
- Estudios de cultivos para determinar microorganismos
- Pruebas de conteo de bacterias
- Pruebas de toxicidad/inhibición de crecimiento bacteriano



2.5.5 Lavado de suelo

El lavado del suelo es un proceso mecánico que consiste en la excavación del suelo del área contaminada, seguida de un tamizado con la finalidad de separar objetos grandes y rocas, posteriormente se lava con agua o una solución acuosa para remover los contaminantes, el efluente contaminado se recupera, se trata y se recicla o se dispone. Generalmente el disolvente de extracción es agua. Los disolventes se seleccionan considerando su capacidad de solubilizar los contaminantes y su toxicidad sobre el ambiente y la salud. Cuando se van a tratar compuestos semivolátiles o poco solubles en agua, se utilizan surfactantes apropiados para mejorar la eficacia de la remoción. Los surfactantes pueden ser muy efectivos para contaminantes orgánicos y los ácidos son útiles para remover metales. Los contaminantes generalmente se encuentran enlazados química o físicamente al cieno o a la arcilla. El cieno y la arcilla se encuentran ligados a grandes partículas de arena y grava. El lavado de suelo separa las partículas finas de cieno y arcilla, de las partículas de grava y arena granular. De esta manera, las partículas grandes se remueven y los contaminantes se concentran en un volumen menor haciendo la restauración posterior más fácil (HWRSM, 1994; Asante-Duah, 1996; Sims, 1990; EPA 540/R-94/043, 1994; Nelson, N. et al. Long, 1993; Suthersan, 1997).

Ventajas:

- Es útil para remover contaminantes orgánicos volátiles, semivolátiles y halogenados, e inorgánicos tales como hidrocarburos, disolventes, plaguicidas y metales
- Disminuye el volumen de suelo contaminado que debe tratarse con otra tecnología más costosa

Desventajas:

- Los contaminantes se transfieren a la fase acuosa
- Requiere remoción del suelo
- Generalmente se utiliza esta técnica acoplada con otra tecnología

Parámetros de caracterización

Parámetros físicos:

- Distribución del tamaño de partícula
- Contenido de arcilla
- Conductividad hidráulica

Parámetros químicos:

- Compuestos orgánicos
- Metales
- Capacidad de intercambio catiónico
- pH
- Coeficiente de partición suelo/agua
- Coeficiente de partición octano/agua

2.5.6 Extracción con vapor

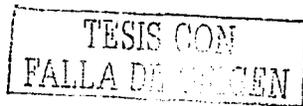
La extracción de contaminantes del suelo con vapor es una técnica que emplea la aireación para remover los compuestos orgánicos volátiles (COV's) presentes en la zona no saturada del sitio contaminado. El sistema de extracción con vapor, es mas efectivo en sitios en los que el derrame o liberación de compuestos orgánicos volátiles es reciente. Esta tecnología es particularmente económica y eficiente para remover COV's de la capa subsuperficial de suelo. También se conoce como venteo de suelo y extracción con vacío.

Esta técnica consiste en la inyección de aire limpio que fluye dentro de la zona no saturada del suelo, el aire arrastra los COV's en fase vapor que se encuentran en los poros, ya que rompe el equilibrio que existe entre los contaminantes del suelo y en la fase vapor, posteriormente, el aire que contiene a los contaminantes es extraído aplicando vacío.

La aplicación de esta técnica es recomendada cuando el contaminante tiene un $P_v \geq 1.0$ mm Hg a 20°C y una constante de la ley de Henry $>$ de 0.001 atm·m³/mol. Además esta técnica se aplica más en sitios donde la zona insaturada es relativamente permeable y homogénea y es más útil su aplicación para tratamiento de compuestos orgánicos volátiles puros y disolventes (HWRSM, 1994; Asante-Duah, 1996; Sims.,1990; EPA 540/R-94/043, 1994; Nelson, N. et al. Long, 1993; Suthersan, 1997).

Ventajas de esta técnica:

- Presenta un bajo costo
- Se puede aplicar a grandes extensiones
- Presenta una mínima perturbación con las operaciones del sitio
- Se puede integrar fácilmente con otras tecnologías de restauración



Desventajas de esta técnica:

- No es útil para compuestos inorgánicos ni COV's semivolátiles
- Debe haber control de emisiones de contaminantes al aire
- No es efectivo abajo del nivel del agua
- Requiere dar tratamiento a la corriente de aire que lleva los contaminantes

Parámetros de caracterización

Parámetros físicos:

- Distribución del tamaño de la partícula
- Permeabilidad
- Porosidad
- Humedad
- Contenido de arcilla

Parámetros químicos:

- Presión de vapor
- Solubilidad
- Volatilidad
- Constante de la ley de Henry
- Coeficiente de partición aire/agua
- Carbono orgánico total
- Capacidad de intercambio catiónico

2.5.7 Encapsulación

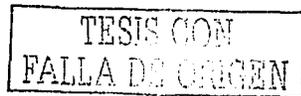
La encapsulación es un proceso empleado para cubrir los residuos peligrosos enterrados o depositados en un sitio para prevenir la migración de los contaminantes. Esta migración puede producirse por el agua de lluvia o el movimiento de agua superficial a través del sitio o por el viento. Las cubiertas generalmente están hechas de una combinación de materiales como fibras sintéticas, arcillas pesadas y algunas veces concreto. Las cubiertas se diseñan para minimizar el movimiento de agua a través de los residuos, deben ser de fácil mantenimiento y resistentes. Cuando se utiliza esta técnica es necesario monitorear el agua subterránea y un sistema de colección de gas si los residuos generan gases (HWRSM, 1994; Asante-Duah, 1996; Sims, 1990; EPA 540/R-94/043, 1994; Nelson, N, et al, Long, 1993; Suthersan, 1997).

Ventajas de esta técnica:

- Presenta un costo menor
- Prácticamente se puede construir sobre cualquier sitio
- Rápida construcción

Desventajas de esta técnica:

- No proporciona tratamiento, sólo evita la dispersión de los contaminantes
- Requiere monitoreo continuo para detectar liberación de contaminantes
- La efectividad a largo plazo depende del mantenimiento



Parámetros de caracterización

Parámetros físicos:

- Tamaño de las partículas
- Contenido de humedad
- Permeabilidad
- Densidad
- Volumen de vacíos

Parámetros químicos:

- pH
- Alcalinidad/acidez
- Compuestos orgánicos
- Metales
- Pruebas de lixiviados

2.5.8 Desorción térmica

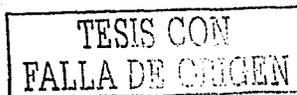
La desorción térmica es un proceso de separación con calor a temperatura baja diseñado para remover contaminantes orgánicos de un sitio. El suelo contaminado se calienta a temperaturas relativamente bajas entre 93 y 482°C de manera que sólo los contaminantes con bajo punto de ebullición se evaporan. Estos gases se colectan para realizar un tratamiento posterior. El calentamiento puede realizarse mediante inyección de vapor por calentamiento directo, calentamiento indirecto a través de las paredes de un horno o por calentamiento libre de oxígeno en un horno sellado. La desorción térmica no es un sistema de incineración, ni se forman subproductos de combustión. Esta técnica es útil para tratar compuestos orgánicos volátiles, bifenilos policlorados y algunos hidrocarburos aromáticos policlorados. Es aplicable para tratar compuestos de peso molecular intermedio (aceites lubricantes, aceites minerales, combustibles) y en suelos relativamente permeables (HWRSM, 1994; Asante-Duah, 1996; Sims, 1990; EPA 540/R-94/043, 1994; Nelson, N, et al. Long, 1993; Suthersan, 1997).

Ventajas de la técnica:

- Útil para tratar compuestos orgánicos volátiles y bifenilos policlorados
- Se obtienen altas eficiencias de remoción

Desventajas de la técnica:

- No es aplicable a compuestos inorgánicos u orgánicos poco volátiles
- Los contaminantes evaporados requieren un tratamiento posterior o disposición de los mismos



2.5.9 Tratamientos químicos

Las sustancias químicas presentan la capacidad de alterar la naturaleza de los materiales, y es la razón de la aplicación amplia que tienen el tratamiento químico en la destrucción de residuos peligrosos. Algunos procesos químicos modifican los materiales peligrosos de manera que se vuelven no tóxicos. En algunos casos, se pueden complementar los métodos químico y biológico. Los principales tratamientos químicos son:

Oxidación química

Los compuestos pueden oxidarse químicamente para formar compuestos no peligrosos o hacerlos más accesibles para remoción o destrucción. Durante el proceso el agente oxidante se reduce. Esta técnica se ha empleado para tratar sustancias orgánicas peligrosas y contaminantes orgánicos en solución acuosa. Su principal uso ha sido para tratar el cianuro en los residuos de la industria de recubrimientos de metales. Los agentes oxidantes más empleados son: el gas cloro, el dióxido de cloro, el hipoclorito, y otros menos usados son: el permanganato de potasio, el peróxido de hidrógeno y el ozono. Los agentes oxidantes son poco selectivos y pueden oxidar otros compuestos presentes en los residuos antes de oxidar el contaminante de interés, por lo tanto es más útil para residuos acuosos diluidos (HWRSM, 1994; Asante-Duah, 1996; Sims, 1990; EPA 540/R-94/043, 1994; Nelson, N, et al. Long, 1993; Suthersan, 1997).

Reducción química

Consiste en la transferencia de electrones reactivos de un compuesto a otro. Los metales, en particular el cromo hexavalente, se reducen mediante la adición de un agente reductor compatible, como por ejemplo, los compuestos reducidos de azufre. Para obtener una reducción correcta, se debe controlar el pH específico de la reacción y la agitación.

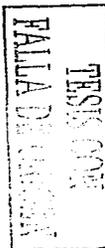
La reducción química se aplica mejor a residuos líquidos libres de compuestos orgánicos. También se utiliza para reducir metales quelados o complejados como cobre y níquel (HWRSM, 1994; Asante-Duah, 1996; Sims, 1990; EPA 540/R-94/043, 1994; Nelson, N, et al. Long, 1993; Suthersan, 1997).

Neutralización.

Continúa siendo uno de los procesos más comúnmente empleados en el tratamiento de residuos peligrosos. Involucra la combinación de una corriente de residuos peligrosos con un ácido o una base para ajustar el pH del líquido a niveles aceptables, que generalmente se encuentran entre 6 y 9. Los productos de la reacción son agua, sales y sólidos precipitados por las reacciones de solubilidad que dependen del pH (HWRSM, 1994; Asante-Duah, 1996; Sims, 1990; EPA 540/R-94/043, 1994; Nelson, N, et al. Long, 1993; Suthersan, 1997).

Oxidación húmeda con aire

Consiste en la oxidación en fase acuosa de sustancias inorgánicas u orgánicas suspendidas o disueltas a temperaturas entre 177 y 315°C y bajo una presión elevada de 300 y 3000 psi.



La presión elevada se usa para mantener el agua en estado líquido permitiendo que la destrucción de los compuestos orgánicos proceda a temperaturas más bajas de las que serían necesarias. El agua sirve para moderar la rapidez de oxidación, removiendo el exceso de calor de reacción. El oxígeno se adiciona como agente oxidante. Se puede emplear esta técnica para tratar sulfuros, mercaptanos, cianuros, hidrocarburos clorados y metales (HWRSM, 1994; Asante-Duah, 1996; Sims, 1990; EPA 540/R-94/043, 1994; Nelson, N, et al, Long, 1993; Suthersan, 1997).

Deshalogenación

Este proceso se emplea para la destrucción química específica de compuestos orgánicos halogenados. Se usan reactivos químicos para remover el halógeno (flúor, cloro, bromo, yodo), para romper las moléculas halogenadas o para cambiar su estructura molecular. El reactivo típico es el sodio metálico (HWRSM, 1994; Asante-Duah, 1996; Sims, 1990; EPA 540/R-94/043, 1994; Nelson, N, et al, Long, 1993; Suthersan, 1997).

Ventajas de esta técnica:

- El tratamiento se puede realizar en fase líquida (zona saturada, o partes inundadas de la zona vadosa)
- Se puede aplicar para sanear suelos contaminados por compuestos orgánico y metales pesados o una combinación de éstos
- Es más útil para residuos acuosos diluidos

Desventajas de esta técnica:

- Requiere una heterogeneidad en la composición del suelo
- Alto costo por el consumo de energía en algunos casos
- Puede ser difícil mezclar los suelos y los compuestos químicos del tratamiento
- Requiere un monitoreo constante a largo plazo

Parámetros de caracterización

Parámetros físicos:

- Contenido de humedad
- Permeabilidad
- Porosidad
- Temperatura

Parámetros químicos:

- pH
- Alcalinidad/acidez
- Principales compuesto orgánicos peligrosos
- Metales
- Compuestos orgánicos
- Cloro total
- Carbono orgánico total
- Capacidad de intercambio catiónico
- Potencial redox
- Solubilidad



2.6 Tecnología de inmovilización

Esta tecnología se encuentra basada en los mecanismos químicos de adsorción, complejación o precipitación que propician que los contaminantes se fijen en los sólidos y no puedan difundirse al ambiente. La tecnología se fundamenta en la reducción de los contaminantes móviles por la introducción de los materiales en polvo, y que tienen una alta capacidad de adsorción reduciendo la conductividad hidráulica del suelo, además de ser económicos.

La base fundamental del proceso, es reducir la concentración de los contaminantes en el agua que se encuentran contenidos en los poros de los suelos, a un valor menor de los límites nacionales para garantizar que no exista una infiltración de concentraciones tóxicas al manto freático. La carga de los contaminantes que se infiltran hacia los acuíferos pueden describirse por la fórmula siguiente:

$$L = Q \cdot C$$

Ecuación 2.1

donde:

L = Carga de contaminantes [g/s]

Q = Gasto de infiltración [L/s]

C = Concentración de contaminantes [g/L]

Para reducir la carga (L) de los contaminantes, y con esto, el riesgo con el ambiente, hay que minimizar el gasto (Q) y la concentración (C) de los contaminantes móviles del agua presentes en el suelo. La reducción del gasto (Q) puede realizarse por mecanismos hidráulicos como el rellenar los poros con partículas finas. La disminución de la concentración de los contaminantes en el agua presente en el suelo (C), se lleva a cabo por mecanismos químicos.

La mezcla de los adsorbentes naturales en polvo con suelo o sólido contaminado, provoca un cambio en la granulometría del sólido y en la conductividad hidráulica, reduciéndose como consecuencia el gasto (Figura 2.2).

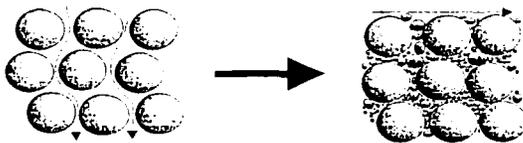


Figura 2.2: Reducción de la conductividad hidráulica por la adición de partículas finas

La introducción de los adsorbentes naturales causa un cambio sobre el equilibrio de la adsorción en el suelo y en la concentración de los contaminantes del agua contenida en el mismo (Figura 2.3).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

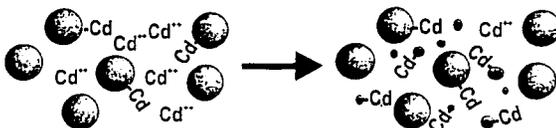


Figura 2.3: Cambio en el equilibrio de la adsorción por la adición de los adsorbentes naturales y la reducción en la concentración de los contaminantes móviles en el agua de los poros

2.6.1 Adsorción de contaminantes por adsorbentes naturales

2.6.1.1 Bentonita cálcica

Las arcillas en general, son rocas sedimentarias, compuestas de un grupo de minerales aluminosilicatos formados por la meteorización de rocas feldespáticas, como el granito. El grano es de tamaño microscópico, esto hace que la superficie de agregación sea mayor que su espesor, lo que permite un gran almacenamiento de agua por adherencia, provocando la hinchazón de algunas variedades. Aunque las arcillas son relativamente estables, pueden sufrir transformaciones. En condiciones muy ácidas, las arcillas pueden ser descompuestas a hidróxidos que se pierden del sistema de suelos pueden ser transportados y depositados. La bentonita es una arcilla del tipo montmorillonita de procedencia volcánica, constituida por silicatos de alúmina hidratada ($Al_2(OH)_2Si_4O_{10}nH_2O$). La montmorillonita se forma en presencia de grandes cantidades de cationes básicos y de hierro. Se pueden acumular cationes básicos, como sucede en las depresiones y en zonas áridas y semiáridas. La bentonita cálcica se forma por intercambiabilidad en su molécula de iones calcio (Ca^{++}). Este puede deberse ya sea por procesos naturales o artificiales. La naturaleza de estos iones intercambiables determina en gran parte sus propiedades. Se conoce con los nombres de arcilla coloidal o silicato aluminico hidratado, su aspecto es polvo de color blanco o rosa pálido, sus propiedades son que se hincha en el agua hasta 13 veces su volumen original. Se obtiene de yacimientos mineros (Fitz, 1985).

Análisis químico

Silice (SiO_2)	55% mín
Alúmina y Hematita ($Al_2O_3Fe_2O_3$)	20% mín
Carbonatos	0.1% máx
Alcalinidad	0.75% máx

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Análisis físico

Gelación a 20% de Bentonita cálcica y 80% de agua	No forma gelación
Humedad de combinación y cristalización	10% máx
Resistencia	Verde 7-9 seco 30 PSI
pH sol 10%	7-9
Pérdida de calcinación	3.0% máx
Hinchamiento	5 cc. (2g en 100 ml agua)
Pérdida por ignición	15-18%
Punto de fusión	1260°C mín
Fineza de malla 200	Pasa el 90% mín

2.6.1.2 Bentonita sódica

La bentonita sódica es una arcilla del tipo montmorillonita de procedencia volcánica, constituida por silicatos de alúmina hidratada, con intercambiabilidad en su molécula de iones Na^+ (Fitz, 1985).

Análisis químico

Sílice (SiO_2)	58% mín
Alúmina y Hematita ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$)	18% mín
Carbonatos	1.0% máx
Alcalinidad	1-2% máx

Análisis físico

Gelación a 25% en solución	16-20%
Humedad	2-3% máx
Pérdida por ignición	15-18%
Hinchamiento	15 cc. (2g en 100 ml agua)
Punto de fusión	133°C mín
Resistencia	Verde 7-9 seco 30 PSI
pH en solución de 10%	7-9
Fineza de malla 200	Pasa el 90% mín

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

2.6.1.3 Óxido de hierro

Polvo de color rojo oscuro soluble en ácido e insoluble en agua, se encuentra compuesto principalmente por óxido de hierro, Fe_2O_3 . Se encuentra en rocas de todas las épocas. Las formaciones macizas se llaman especularitas y las terrosas ocre rojo. Esta es una variedad terrosa sin brillo de color rojo. Su dureza varía entre 5,5 y 6,5 y su densidad lo hace entre 4,2 y 5,25 gr/cm^3 (Fitz, 1985)

Análisis químico

Pureza de fierro (Fe_2O_3)	87.761%
Contenido de alúmina (Al_2O_3)	0.905%
Silicato de combinados (MgO y CaO_5)	3.765%
Fe_2O_3	3.88%

Análisis físico

Color	Café rojizo
Textura	polvo

Análisis granulométrico

Malla	%
20	0.0 máx
30	5.0 máx
140	80 mín
Charola-140	15.0 mín

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

2.6.1.4 Carbón activado

Tiene una superficie de 500 a 1,400 m^2/g y se prepara a partir de gran variedad de compuestos carbonados, tales como madera, lignina, cáscara de nuez, carbón, lignita, turba, bagazo, aserrín y residuos de petróleo; los mejores son fabricados con base en la lignina y lignita. El carbón activado es clasificado de acuerdo a su estado físico (polvo o granular) o su uso (potabilización, decoloración, adsorción, etc.). El carbón activado en polvo (CAP) posee dos propiedades importantes, la filtrabilidad y la densidad. Las principales propiedades físicas del carbón activado granular (CAG) son la dureza y el tamaño de la partícula. Esta última propiedad es la más económica en cuanto a la regeneración. La velocidad de adsorción del carbón activado en polvo es 100 veces mayor que la del carbón en gránulos. Sin embargo, el carbón activado en polvo es más difícil de manejar. El carbón activado se aplica para remover colorantes, fenoles, sustancias con bajo peso molecular, la

mayoría de los metales pesados, etc. También, es posible la remoción de pesticidas como: Aldrín, Endrín, Dieldrín, DDD, DDT, DDE, Toxafeno y Aroclor 1242 (Jiménez, 2001).

Análisis

Origen	Vegetal
Humedad	12% máx
Aspecto	Polvo fino color negro obscuro
pH	4.0 – 7.5
Cenizas	12% máx
Absorción yodo	78%
Granulometría	100 – 400 mallas

2.6.1.5 Carbón metalúrgico o “coke”

Los diferentes tipos de carbón se clasifican según su contenido de carbono fijo, el carbón metalúrgico o coke, es destilado casi como carbono puro. El carbón coke, es un residuo duro y poroso que resulta después de la destilación destructiva del carbón. Tiene un color gris negruzco y un brillo metálico. Es de origen mineral y se obtiene de mina a través de las operaciones de extracción, transporte, trituración y lavado por flotación. Para elevar su poder calorífico y otras propiedades como la dureza y porosidad, se somete a un coquizado en hornos especiales.

Análisis químico

Carbón fijo (B.S.)	76% min
Materia volátil	3% máx
Cenizas	20% máx
Azufre	1.0% máx

Análisis físico

Dureza	70 HBN min
Humedad	5% máx

Análisis granulométrico

Malla	%
+ 200	25
+ 300	50
- 325	24.8

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.6.2 Parámetros que influyen en la inmovilización

pH

Es un factor esencial. La mayoría de los metales tienden a estar más disponibles a pH ácido, excepto As, Mo, Se, y Cr, los cuales tienden a estar más disponibles a pH alcalino. El pH, es un parámetro importante para definir la movilidad del catión, debido a que en medios de pH moderadamente alto se produce la precipitación como hidróxidos. En medios muy alcalinos, pueden nuevamente pasar a la solución como hidroxicomplejos.

Por otra parte, algunos metales pueden estar en la disolución del suelo como aniones solubles. Tal es el caso de: Se, V, As, Cr. La adsorción de los metales pesados se encuentra fuertemente condicionada por el pH del suelo (García y Dorronsoro, 2001).

Textura

La arcilla tiende a adsorber a los metales pesados, que quedan retenidos en sus posiciones de cambio. Por el contrario los suelos arenosos carecen de capacidad de fijación de los metales pesados, los cuales pasan rápidamente al subsuelo y pueden contaminar los mantos freáticos (García y Dorronsoro, 2001).

Mineralogía de las arcillas. Cada especie mineral tiene unos determinados valores de superficie específica y descompensación eléctrica. Ambas características son las responsables del poder de adsorción de estos minerales (García y Dorronsoro, 2001).

Materia orgánica

Reacciona con los metales formando complejos de cambio y quelatos. Los metales una vez que forman quelatos o complejos pueden migrar con mayor facilidad a lo largo del perfil. La materia orgánica puede adsorber tan fuertemente algunos metales, como es el Cu, que pueden quedar en posición no disponible por las plantas. Por lo que algunas plantas, de suelos orgánicos, presentan carencia de ciertos elementos como el Cu. El Pb y el Zn forman quelatos solubles muy estables. La complejación por la materia orgánica del suelo es una de los procesos que gobiernan la solubilidad y la bioasimilación de metales pesados. La toxicidad de los metales pesados se debe en gran medida por su fuerte tendencia a formar complejos organometálicos, lo que facilita su solubilidad, disponibilidad y dispersión. La estabilidad de muchos de estos complejos frente a la degradación por los organismos del suelo es una causa muy importante de la persistencia de la toxicidad. Pero también la presencia de abundantes quelatos puede reducir la concentración de otros iones tóxicos en la solución del suelo (García y Dorronsoro, 2001).

Capacidad de cambio

Es función del contenido de arcilla y materia orgánica, fundamentalmente. En general cuanto mayor sea la capacidad de intercambio catiónico, mayor será la capacidad del suelo de fijar metales. El poder de adsorción de los distintos metales pesados depende de su valencia y del radio iónico hidratado ya que a mayor tamaño y menor valencia, quedan retenidos minoritariamente (García y Dorronsoro, 2001).

TESTE CON
FALLA DE ORIGEN

Condiciones redox

El potencial de oxidación-reducción es responsable de que el metal se encuentre en estado oxidado o reducido. Los suelos con altos contenidos de Fe y Mn tienen una gran capacidad de adsorber metales divalentes, especialmente Cu, Pb y en menor extensión Zn, Co, Cr, Mo y Ni.

Presencia de carbonatos: La presencia de carbonatos, garantiza el mantenimiento de valores altos de pH, los cuales tienden a precipitar los metales pesados. El Cd, y otros metales, presentan tendencias a quedar adsorbidos por los carbonatos.

Presencia de salinidad: El aumento en salinidad puede incrementar la movilización de metales pesados por dos mecanismos. Primero los cationes asociados con las sales (Na, K) pueden reemplazar a metales pesados en lugares de adsorción. Segundo, los aniones de cloruro pueden formar complejos solubles estables con metales pesados tales como Cd, Zn y Hg.

Según la forma en la que se encuentre el metal retenido en el suelo, será la disponibilidad por las plantas y por lo tanto la incorporación a los organismos. Por lo que, al transcurrir el tiempo disminuye la disponibilidad de los metales, ya que se van fijando en las posiciones de adsorción más fuertes y también los geles van envejeciendo y se van volviendo más cristalinos (García y Dorronsoro, 2001).

2.6.3 Impermeabilización de suelos contaminados

La infiltración de los contaminantes depende en gran medida de la permeabilidad del suelo y ésta de la compactación, del tamaño de los granos que lo constituyen (textura), de la disposición de estos granos estructurando el suelo y del grado de saturación por agua absorbida o capilar. Auvinet G., en 1998, publicó una revisión bibliográfica sobre la impermeabilización de suelos que se resume en este capítulo. En la actualidad existen productos y revestimientos para la impermeabilización de suelos los cuales minimizan la penetración de los contaminantes. Los mecanismos para la impermeabilización de suelos se pueden clasificar en tres grupos (EPA, 1974):

1. Mecanismo de sellado natural y tratamientos químicos
2. Revestimientos rígidos
3. Revestimientos flexibles

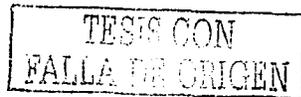
A continuación se mencionarán cada uno de ellos:

1. Mecanismo de sellado natural y tratamientos químicos

El sellado de un suelo puede ocurrir por algunos de los mecanismos siguientes:

- a) Taponamiento físico de los vacíos del suelo
- b) Taponamiento químico de los vacíos del suelo por intercambio iónico
- c) Taponamiento biológico y orgánico por crecimiento microbiano

Varios de los productos químicos que se mezclan con el suelo han sido empleados con éxito muy variables para sellar suelos. Los cationes monovalentes (iones de sodio, potasio y



amonio) disminuyen químicamente la porosidad del suelo al reemplazar los cationes polivalentes cálcicos. Se ha encontrado que la impermeabilización química puede ser efectiva en suelos con un mínimo de 8 % de arcilla y de 10 % de limo. Las sales que se usan con más frecuencia para el sellado químico, son los polifosfatos de sodio (pirofosfato tetrasódico o tripolifosfato sódico), el carbonato de sodio y el cloruro de sodio (Departamento de Agricultura U.S.A., 1971). Debido a la compleja y variable composición química de los suelos, los tratamientos de esta naturaleza solamente deben aplicarse después de un estudio de laboratorio que demuestre su efectividad. Se trata en realidad de una técnica incipiente. Una segunda categoría de productos químicos está constituida por los aditivos que se agregan al agua para reducir las filtraciones. Algunos de estos productos, a base de polímeros, aumentan la atracción iónica de las partículas del suelo hacia el agua, con lo que se incrementa el diámetro efectivo de las mismas y se reducen las dimensiones de los poros. Otros son emulsiones de cera que forman una membrana delgada en el fondo. Estos productos permiten reducir pero no eliminar las filtraciones. Sus principales atractivos son su costo bajo y la posibilidad que ofrecen de corregir en cierta medida los problemas de filtración. Las arcillas altamente expansivas, tales como la bentonita, pueden reducir efectivamente la permeabilidad del suelo natural. La bentonita es una arcilla montmorilonítica sódica que exhibe un alto grado de expansividad, impermeabilidad y baja estabilidad en presencia de agua. Para revestir suelos, es posible dejar decantar una suspensión de bentonita en agua o mezclar la bentonita en seco con el suelo natural o con arena. También puede aplicarse sobre una cama de grava para sellar los huecos entre partículas o enterrarse bajo una capa protectora de suelo. El comportamiento de los revestimientos de bentonita depende en gran parte de la calidad de la misma. Algunos depósitos de bentonita pueden contener algo de arena, limo y arcilla como impurezas. La bentonita finamente molida es generalmente, más adecuada para el revestimiento que la bentonita en greña. Por lo general, la bentonita debe tener un contenido de agua inferior al 20 %. Esto resulta especialmente importante para membranas delgadas. Los revestimientos de bentonita deben generalmente colocarse a mano lo que implica un costo alto. No debe esperarse que la bentonita colocada simplemente sobre la superficie del terreno dure más de 2 a 4 años. Las capas de bentonita enterradas pueden tener una durabilidad mayor (Rollings y Dylla, 1971).

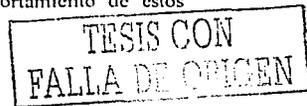
Actualmente existen en el mercado paneles prefabricados de bentonita que, diseñados originalmente para impermeabilizar cimentaciones, se han usado también para suelos. No existe hasta ahora evidencias publicadas claras respecto al comportamiento de estos paneles.

2. Revestimientos rígidos

Los revestimientos rígidos más comunes se hacen a base de concreto hidráulico, suelo cemento y concreto asfáltico.

a) Revestimientos de concreto hidráulico y concreto lanzado

La experiencia con revestimientos de concreto hidráulico es contradictoria. Algunos revestimientos han dado buenos resultados, mientras que otros han presentado problemas graves de filtraciones. Los puntos críticos de esta técnica parecen ser los siguientes:



- Necesidad de un sustrato de apoyo firme
- Composición del concreto que minimice el agrietamiento por contracción
- Juntas de contracción suficientemente numerosas
- Selladores de buena calidad en las juntas de contracción

El concreto lanzado tiene la ventaja de poder aplicarse a superficie irregulares, pero presenta los mismos problemas que el concreto hidráulico tradicional. Además, es sensible a asentamientos diferenciales y las grietas que se forman son difíciles de reparar, es inestable si se presentan presiones hidrostáticas atrás del mismo.

b) Revestimientos de suelo cemento

Por un suelo cemento se entiende una mezcla de suelo arenoso con cemento. Esta mezcla es atractiva por su costo bajo respecto al concreto hidráulico, si existe arena en el sitio de construcción. El suelo-cemento presenta siempre grietas de contracción que solamente pueden reducirse, pero no eliminarse, mediante un control estricto de compactación, contenido de agua y tiempo de curado.

c) Revestimientos de concreto asfáltico

Los revestimientos de concreto asfáltico mezclados en caliente (Hinkle y Dixon, 1978) se han usado frecuentemente como revestimientos en espesores del orden de 5 cm. Se emplea un concreto asfáltico análogo al usado en carreteras. Sin embargo, su contenido de asfalto es mayor (6.5 a 9.5 %) y el porcentaje de "filler" mineral más alto; además se usa un asfalto de baja penetración (4 a 7 mm). Se obtiene en esta forma una mezcla de porosidad baja y prácticamente impermeable después de compactarse. Sin embargo, es difícil reproducir en el campo el tipo óptimo de mezcla que se haya definido en el laboratorio. Otros problemas que pueden presentarse son los siguientes:

- Agrietamiento por deformación del sustrato de apoyo
- Agrietamiento por efecto de agentes climáticos
- Ataque por ciertos líquidos y en particular los aceites

3. Revestimientos flexibles

Los revestimientos flexibles más comunes son los siguientes (Tabla 2.2):

1. Membranas sintéticas
2. Membranas asfálticas
3. Elementos prefabricados a base de asfalto
4. Revestimiento a base de suelo compactados



Tabla 2.2: Productos y técnicas de impermeabilización (Kays, 1997)

Selladores	Revestimientos rígidos	Revestimientos flexibles
Arcillas bentoníticas Tratamientos químicos del suelo Aditivos al agua	Concreto hidráulico Suelo-cemento Concreto asfáltico Concreto lanzado	Membranas sintéticas (plásticos y elastómeros) Membranas asfálticas Paneles asfálticos Suelos compactados
Continuos	Discontinuos	
Membranas sintéticas Membranas asfálticas Paneles asfálticos	Suelos compactados Concreto lanzado Concreto asfáltico Suelo-cemento Arcillas bentoníticas Tratamientos químicos del suelo Aditivos al agua	
Impermeables	Semipermeables	
Membranas sintéticas Paneles asfálticos	Suelos compactados Concreto lanzado Concreto hidráulico Concreto asfáltico Membranas asfálticas Suelo-cemento Arcillas bentoníticas Tratamientos químicos del suelo Aditivos al agua	

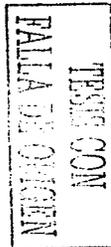
1. Membranas sintéticas

Existen muchos tipos diferentes de membranas sintéticas: las fabricadas a base de plásticos y las realizadas con elastómeros. Las membranas plásticas y las elastoméricas son las más populares cuando se busca obtener una permeabilidad prácticamente nula. Se adquieren en grandes hojas que facilitan su instalación. Si se seleccionan y se instalan adecuadamente, estas membranas resisten el ataque de la mayoría de los productos químicos y dan lugar a filtraciones muy bajas.

Los productos sintéticos más conocidos son los siguientes: cloruro de polivinilo (PVC), polietileno (PE), polietileno clorinado (CPE), hule butilo (EPT y EPDM), policloropreno (neopreno), polietileno clorosulfonato (hypalon), poliolefin elastizado (3110) (Kays, 1997).

2. Membranas asfálticas

Las membranas flexibles a base de asfalto se forman regando directamente el asfalto caliente o rebajado sobre el terreno natural o sobre una tela o fieltro de refuerzo. La membrana puede protegerse con una capa de suelo. Los resultados obtenidos con esta técnica son muy variables. Se sabe de una aplicación de esta técnica en México con tela de refuerzo de yute; el costo resultó comparable al de los mejores revestimientos sintéticos (Kays, 1997).



3. Elementos prefabricados a base de asfalto

Las láminas asfaltadas prefabricadas son paneles de 4 a 13 mm de espesor constituidos por una tela de fibra de vidrio impregnada con asfalto. Las dimensiones de los paneles son relativamente pequeñas para permitir su transporte (0.90 a 1.20 m de ancho y 1.80 a 4.50 m de largo) (Kays, 1997).

4. Revestimiento a base de suelo compactados

Históricamente, el sistema de recubrimiento con el más largo registro de operación exitosa es el suelo compactado. Además este tipo de recubrimiento resulta frecuentemente ser el más económico. Una capa de suelo nunca es totalmente impermeable, pero solamente deja pasar una cantidad controlada de líquido. Estas filtraciones pueden ser inferiores a las que se presentan con otros sistemas más costosos por consecuencia de defectos de instalación o de fabricación. La clave del éxito de esta técnica está en la selección adecuada del tipo de suelo, en su preparación y en el método de colocación.

La impermeabilización con un suelo compactado es una técnica delicada que requiere un buen conocimiento de las propiedades de los suelos y un riguroso control de calidad (Auvinet y Hiriart, 1980).

Un revestimiento de suelo debe combinar generalmente varias propiedades: 1) Una baja permeabilidad, estabilidad ante los gradientes fuertes a los que se encuentran sometido y 2) Una resistencia a la erosión.

La permeabilidad de los suelos finos, no es una característica inherente del material sino que depende básicamente de su estructura. Para suelos compactados, la permeabilidad varía considerablemente con el contenido de agua y el método de compactación.

Cuando el material se compacta del lado seco respecto al óptimo Proctor, las partículas de arcilla forman flocúlos o grumos que oponen una resistencia alta al rearreglo durante la compactación y dan lugar a una estructura con una alta proporción de poros grandes. Para contenidos de agua altos, los grumos se debilitan y los poros grandes tienden a desaparecer. La influencia radical de la proporción de poros grandes sobre la permeabilidad, aun para una misma porosidad, puede entenderse si se admite que los poros de un suelo saturado pueden idealizarse como tubos de sección transversal constante paralelos a la dirección del flujo (Mitchell, 1965).

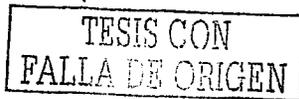
El gasto a través de un poro dado será, con la ley de Poiseuille:

$$q = \left[\frac{\gamma}{8\mu} \right] \pi \times i R^4$$

Ecuación 2.2

donde:

- μ = viscosidad del flujo
- γ = peso volumétrico del permeante
- i = gradiente hidráulico
- R = radio del tubo



En la ecuación 2.2 se observa que el gasto depende del radio del poro a la cuarta potencia. Cualquier proceso que destruye los poros más grandes, reducen por tanto considerablemente la permeabilidad, aun si ocurre a porosidad constante. Para reducir eficientemente la permeabilidad, es importante dar al suelo una estructura adecuada que trate de disminuir su porosidad considerando la selección del material existen dos opciones: 1) Emplear un material fino plástico poco permeable o 2) Elegir un material natural (o una mezcla) que combine, en la medida de lo posible, todas las propiedades deseables (Mitchell, 1965).

2.6.4 Reúso de suelos contaminados como capa sellada

Los suelos contaminados pueden ser tratados por inmovilización, mediante la adición de adsorbentes naturales (bentonita cálcica y carbón activado), posteriormente pueden ser reusados en un relleno sanitario, como material de compactación en la construcción de capas selladas. Una herramienta básica para el control de los riesgos en los basureros es la capa sellada. El tipo y la estratificación de las capas determinan la cantidad de las precipitaciones, mismas que se infiltran en el cuerpo de basura y forman lixiviados.

2.6.4.1 Aspectos básicos de rellenos sanitarios

El efecto ambiental, ocasionado por los residuos vertidos en una forma inadecuada, va en aumento cada vez más, contaminando el agua, suelo y aire (Jaramillo, 1991).

a) Contaminación del agua

Los lixiviados, se presentan principalmente con las lluvias o como producto de la descomposición de los residuos. Son líquidos que al percolar a través de los desechos arrastran contaminantes solubles y sólidos pequeños, transportándolos hasta los mantos freáticos o las corrientes de agua superficiales (Jaramillo, 1991).

b) Contaminación del suelo

Deterioro estético y desvalorización del terreno como de las áreas vecinas, por el abandono y acumulación de los desechos sólidos a cielo abierto. También se contamina el suelo debido a las distintas sustancias depositadas allí, sin ningún control (Jaramillo, 1991).

c) Contaminación del aire

En los tiraderos a cielo abierto es evidente el impacto negativo causado por los desechos, debido a los incendios y humos que reducen la visibilidad y son causa de irritaciones nasales y de la vista, así como de incremento en las afecciones pulmonares, además de las molestias originadas por los malos olores (Jaramillo, 1991).

Por los efectos negativos causado por los residuos, es necesario el diseño y construcción de un relleno sanitario que cumpla con las normas en el cual se señalen cuales son las medidas de seguridad en cada uno de sus componentes, así como las medidas de sellado (Figura 2.4).

FALLA DE ORIGEN
TESIS CON

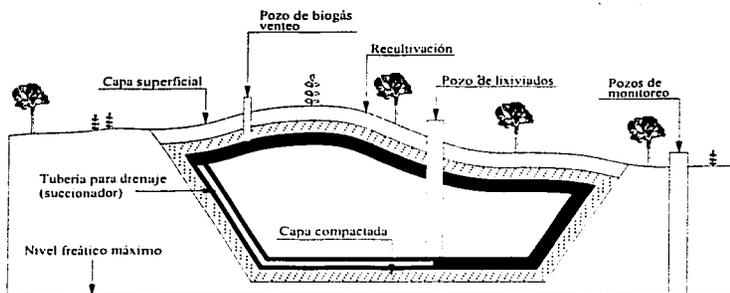


Figura 2.4: Construcción de un relleno sanitario, "medidas de sellado en gran escala para prevenir la infiltración de contaminantes"

2.6.4.2 Requisitos para el diseño de una capa sellada

Los requisitos de diseño de una capa sellada en la cual se establecen las condiciones que deben reunir los sitios destinados para su construcción, son variables en diferentes países. Para un mejor análisis las normas internacionales de Estados Unidos de América (U.S. EPA/530-SW-86-031, 1986) y Alemania (TA-Siedlungsabfall, 1993); en conjunto con México (NOM-084-ECOL-1994), citan los siguientes parámetros (Tabla 2.3).

Tabla 2.3: Requisitos de diseño para construcción de una capa sellada

Parámetros	México	Alemania	U.S.A
Tierra vegetal	0.60 m	≥ 1.0 m	1.0 m
Drenaje:			
Coefficiente "k"	-	≥ 1*10 ⁻³ m/s	-
Capa mineral:			
Pendiente (s)	6 %	5 %	5 %
Espesor	0.15 – 0.30 m	≥ 0.5 m	0.5 m
Coefficiente "k"	1x10 ⁻⁸ m/s	≤ 5x10 ⁻⁹ m/s	1x10 ⁻⁹ m/s
Partículas finas	-	≥ 20 %	20 %
Arcillas	-	≥ 10 %	10 %
Sustancias orgánicas	-	≤ 5 %	5 %
Compactación	-	≥ 95 %	95 %
Fuente:	NOM-084-ECOL-1994	TA-Siedlungsabfall, 1993	EPA 530-SW-86-031, 1986

FALLA DE COPIEN
 TESIS CON

Las capas selladas:

- a) Permiten una desviación controlada de las precipitaciones
- b) Impiden el contacto directo con la basura
- c) Protegen el cuerpo de la basura contra actividades de animales y penetración de las raíces
- d) Impiden la salida lateral de los lixiviados
- e) Pueden controlar la salida de biogás
- f) Integran al basurero en el paisaje y ecosistema existente

Un sistema de capa sellada para la protección de los estratos de un relleno sanitario y de los residuos, constituye los siguientes componentes (Figura 2.5).

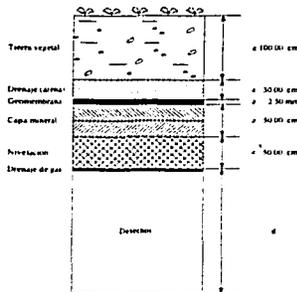


Figura 2.5: Componentes de una capa sellada (TA-Siedlungsabfall, 1993)

La Norma Alemana (TA-Siedlungsabfall, 1993) en un sistema de capa sellada de un relleno sanitario, constituye los siguientes componentes (Figura 2.6 y 2.7):

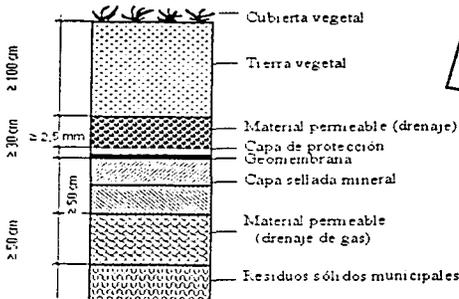


Figura 2.6: Componentes de cobertura

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

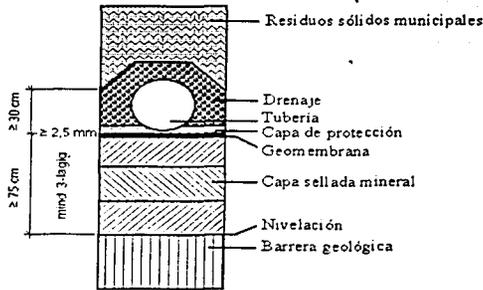


Figura 2.7: Componentes de la base

La normatividad mexicana para la construcción y diseño de un relleno sanitario adaptado del borrador (NOM-XXX-ECOL-2000), constituye los siguientes componentes (Figura 2.8 y 2.9):

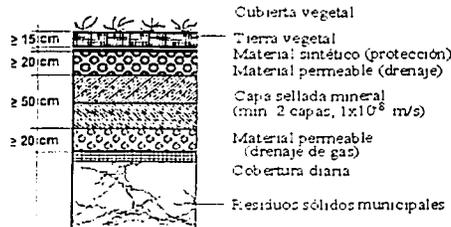


Figura 2.8: Componentes de cobertura final

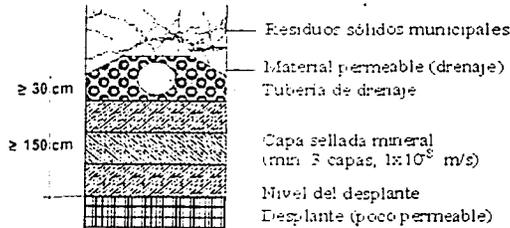


Figura 2.9: Componentes de la base

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3. METODOLOGÍA

3.1 Características de los suelos

El término "Suelo" puede tener diferentes matices de significados dependiendo del contexto en el que se use. Para los fines de este trabajo, la palabra suelo representa todo tipo de material térreo que se puede utilizar, desde un relleno de desperdicio, hasta aquel material suelto o excavable en el cual, o con el que se trabaja. Las propiedades físicas y químicas de los suelos influyen en gran parte sobre la infiltración, la contaminación de acuíferos y en la retención de agua. Las propiedades más importantes de las que engloban estos grupos son el tamaño de partícula, la porosidad, la humedad, la composición química, el contenido o porcentaje de arcilla, la capacidad de intercambio de cationes y el contenido o porcentaje de materia orgánica. Por ejemplo, el tamaño de partículas de los suelos y el tamaño de los poros en suelos arcillosos, en donde el tamaño de partícula es del orden de micras, predominan los tamaños de poros más pequeños, mientras que en suelos arenosos, los poros de un suelo son mayores, siendo menor la cantidad total de poros. En mecánica de suelos se habla de la porosidad o de la relación de vacíos.

Clasificación de los suelos

Existen diferentes sistemas para clasificar e identificar un suelo, la mayor parte de éstos divide a los suelos en tres grupos principales: gruesos, finos y orgánicos. Para el propósito básico de mecánica de suelos se utilizará el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), de Arturo Casagrande, 1942.

Este sistema está basado en el tamaño de las partículas, sus cantidades y variedad de tamaños, así como en las características plásticas de los granos finos.

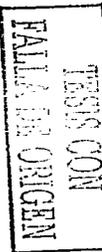
a) Tamaño

Dentro del rango de tamaños del sistema hay dos divisiones, 1) De los granos gruesos y 2) De los granos finos.

1) Los granos gruesos son: partículas retenidos en la malla número 200 (0.074 mm), y los granos finos son las que pasan la malla número 200 (0.074 mm). 2) Los granos finos son de dos tipos: limo y arcilla. En el Sistema Unificado de clasificación de Suelos (Tabla 3.1) no se hace distinción de tamaño entre limos y arcillas, se diferencian más bien por su comportamiento, tomando en cuenta sus características de plasticidad, las cuales están relacionadas con las propiedades mecánicas e hidráulicas. Las propiedades mecánicas e hidráulicas más importantes son: 1) Características de esfuerzo-deformación, 2) Resistencia, 3) Compresibilidad, 4) Permeabilidad, 5) Velocidad de variación volumétrica.

Otros sistemas de clasificación de suelos definen a las arcillas como aquellas partículas menores de 5 micras (0.005 mm). Algunos usan 2 micras y definen el limo como finos mayores que el tamaño de las arcillas (Badillo, 1997).

Suelos orgánicos: la materia orgánica es con frecuencia un componente del suelo, pero no se le asigna ningún tamaño de grano específico, ya que varía en tamaño desde partículas



coloidales de dimensión molecular hasta pedazos de materia vegetal, parcialmente descompuesta, de varios centímetros de longitud.

Tabla 3.1: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos "ASTM D2488-2000"

Fracciones	Nombres típicos	Norma ASTM		Descripción
		Designación alternativa	Tamaño de abertura (mm)	
Grosos	Grava gruesa	3"	75	Pasa la malla 3", pero es retenido en la malla ¼"
		2"	50	
		1 ½"	37.5	
		1"	25	
	Grava fina	3/4"	19	Pasa la malla ¼", pero es retenida en la malla No 4
		3/8"	9.5	
	Arena gruesa	No 4	4.75	Pasa la malla No 4, pero es retenido en la malla No 10
		No 8	2.36	
		No 10	2.00	
	Arena media	No 16	1.18	Pasa la malla No 10, pero es retenido en la malla No 40
		No 20	0.850	
		No 30	0.600	
		No 40	0.425	
	Arena fina	No 50	0.300	Pasa la malla No 40, pero es retenido en la malla No 200
		No 60	0.250	
No 100		0.150		
No 140		0.106		
No 200		0.075		
Finos	Limo y arcilla	< No 200	0.075	Pasan la malla No 200

b) Características de comportamiento de los componentes de un suelo

Arena y grava

Estos materiales son considerados como partículas gruesas. Los suelos con el predominio del contenido de arena suelen tener una baja capacidad de retención de agua y una permeabilidad alta; en general, tienen una buena aireación y buen drenaje, lo que supone velocidades de infiltración altas. En la arena y grava los poros son mayores, siendo menor la cantidad total de los poros. El agua se mueve más rápido a través de poros de gran tamaño y retienen poca agua, por lo tanto, los suelos de grano grueso drenan rápidamente.

Los limos

Son los materiales finos no plásticos algunos sistemas de clasificación lo definen como partículas menores de 50 µm. Son inherentemente inestables en presencia de agua, y tienen la tendencia a ponerse en suspensión cuando se saturan, son medianamente impermeables, difíciles de compactar, y son altamente susceptibles a hinchamientos por heladas.

Las arcillas

Son los materiales finos plásticos, otros sistemas de clasificación lo definen como partículas menores de 2 µm. Tienen baja resistencia a la deformación cuando están

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

húmedas, pero al secarse forman masas cohesivas y duras. Las arcillas son de baja permeabilidad, difíciles de compactar cuando están húmedas, e imposibles de drenar por gravedad. Son características de algunas arcillas, las grandes expansiones y contracciones que sufren de acuerdo con los cambios en su contenido de humedad.

Materia orgánica

Los suelos orgánicos son de color gris oscuro o negro y generalmente tienen un olor característico a descomposición. Las arcillas orgánicas presentan una sensación esponjosa en su rango plástico. Los suelos de alto contenido de materia orgánica tienden a crear vacíos originados por descomposición o a cambiar las características físicas de la masa de suelo por medio de alteración química, lo que hace de ellos materiales inadecuados para usarse en diseños de ingeniería por ser más compresibles y menos estables.

3.2 Mecánica de suelos

A continuación se expondrán en breve los objetivos específicos de esta fase experimental

- Preparar la mezcla de la arena, grava, carbón activado y bentonita cálcica.
- Obtener la humedad óptima para las distintas cantidades de la mezcla.
- Obtener la constante de conductividad hidráulica (k).
- Disminuir la conductividad hidráulica del suelo a valores establecidos en normas nacionales e internacionales para una capa mineral (NOM-084-ECOL-1994, U.S. EPA/530-SW-86-031, 1986 y TA-Siedlungsabfall, 1993).
- Adaptar la compactación a las necesidades del experimento en el sistema de columnas de hidrogequímica.

3.2.1 Mezclas

La elaboración de la mezcla consiste en combinar los suelos (arena y grava) más la adición de adsorbentes naturales (bentonita cálcica y carbón activado).

Las mezclas se elaborarán con diferentes cantidades de adsorbentes naturales (Tabla 3.2), acorde con las normas "U.S. EPA/530-SW-86-031, 1986 y TA-Siedlungsabfall, 1993", las cuales establecen un contenido mayor o igual del 10% de arcillas, para la conformación de una capa mineral.

Tabla 3.2: Cantidades de los suelos y adsorbentes naturales

Materiales	Mezcla			
	1	2	3	4
Bentonita cálcica y carbón activado [%]	5.00	7.50	10.00	15.00
Grava y arena [%]	95.00	92.50	90.00	85.00

La cantidad de los adsorbentes naturales es del 90 % de bentonita cálcica (bc) y de un 10 % de carbón activado (ca) para las distintas mezclas como se ilustra en la Figura 3.1, la grava

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

(g) y la arena (s) se subdividen en 50 % para ambos materiales de sus cantidades correspondientes.

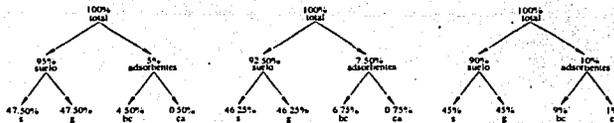


Figura 3.1: Diagrama de flujo correspondiente para cada material

Los materiales para la elaboración de la mezcla, en las distintas cantidades se establece de la siguiente manera, Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Cantidad de los diferentes materiales en la mezcla

Materiales	Mezcla			
	1	2	3	4
Carbón activado [%]	0.50	0.75	1.00	1.50
Bentonita cálcica [%]	4.50	6.75	9.00	13.50
Grava [%]	47.50	46.25	45.00	42.50
Arena [%]	47.50	46.25	45.00	42.50

Los experimentos fueron diseñados con una muestra de 2,500 g, lo cual, se encuentra establecida por la prueba Próctor estándar (ASTM D698-2000). A partir de este peso final se deducieron las siguientes cantidades para las distintas mezclas, Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Cantidad de los diferentes materiales en la mezcla

Materiales	Mezcla			
	1	2	3	4
Carbón activado [g]	12.50	18.75	25.00	37.50
Bentonita cálcica [g]	112.50	168.75	225.00	337.50
Grava [g]	1,187.50	1,156.25	1,125.00	1,062.50
Arena [g]	1,187.50	1,156.25	1,125.00	1,062.50
Total	2,500.00	2,500.00	2,500.00	2,500.00

Además de la elaboración de las mezclas se realizaron pruebas de compactación y permeabilidad cuyas metodologías son descritas brevemente a continuación.

3.2.2 Prueba de compactación

Se entiende por compactación de los suelos todo proceso que aumente el peso volumétrico de un material granular. En general, es conveniente compactar un suelo para incrementar su resistencia al esfuerzo cortante, reducir su compresibilidad y hacerlo más impermeable. El acomodo de las partículas, en un suelo, no sólo depende de las características del

TESIS COMPLETA
 FALTA DE ORIGEN

dispositivo que se usó para compactarlo, sino fundamentalmente de la humedad que tiene el material y de la energía de compactación. Si las partículas se encuentran secas, la fricción intergranular opone una resistencia mayor al desplazamiento relativo entre ellas, que si se encuentran lubricadas por una película de agua; por el contrario, si la masa tiene una humedad elevada, el agua llena vacíos que podrían ser ocupados por partículas en un arreglo más denso. Esto último es cierto en suelos que tienen un alto porcentaje de finos y no en las arenas gruesas y gravas. Por lo tanto, dado un proceso de compactación para cada material, existe un contenido de agua con el que se obtiene el máximo peso volumétrico.

Por lo general, las técnicas de compactación se aplican a rellenos artificiales, siendo de gran utilidad en geotecnia ambiental en la construcción de pantallas impermeables, diseño de recubrimientos y cubiertas para rellenos sanitarios, en donde se busca reducir el nivel de contaminación mediante la utilización de materiales compactados (suelos arcillosos), por ejemplo, en la construcción de una capa sellada que impida la contaminación del acuífero.

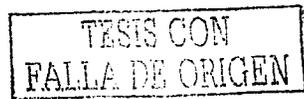
La prueba que se describe a continuación es una de las más aceptadas para determinar las condiciones óptimas de compactación de un suelo en el laboratorio, con el objeto que proporcione valores similares en cualquier sitio que se efectúe (en campo). Esta prueba es detallada en la norma ASTM D698-2000.

Equipo

- a) Cilindro Próctor de compactación con un diámetro interior de 10 cm; y de altura 11.5.
- b) Extensión del cilindro con igual diámetro interior y 6.5 cm de altura.
- c) Pisón cilíndrico, de 5 cm de diámetro en base y un peso de 2.49 kg.
- d) Guía de lámina galvanizada, de 32.8 cm con escalón de 30.5 cm para dar caída libre del martillo.
- e) Base estándar de 325 kg de peso.
- f) Charola de lámina galvanizada.
- g) Charola de plástico.
- h) Juego de espátulas de acero para enrasar.
- i) Horno a temperatura constante de 110 °C.
- j) Balanza de torsión o eléctrica, con capacidad de 1 kg y sensibilidad de 0.10 g.
- k) Cápsulas de porcelana.
- l) Cucharón.
- m) Atomizador.
- n) Mortero y pistilo.

Procedimiento

1. Se seca 2,500 g de muestra en un horno eléctrico a temperatura constante de 110 ± 5 °C durante 24 horas, si hay formación de gránulos, se procede a triturar el material.
2. Se esparce agua en una cantidad tal que la humedad resulte un poco menor del 10%, si el material es arenoso, es conveniente ponerle una humedad menor. Esta operación puede efectuarse empleando un atomizador.
3. Se revuelve perfectamente el material tratando que el agua agregada se distribuya uniformemente.



4. Usando el cucharón, se vacía en el cilindro Próctor, previamente armado con su extensión, material suficiente para obtener una capa floja de unos 8 cm de espesor.
5. Esta capa se compacta mediante 25 golpes de pisón procurando repartirlos en toda la superficie utilizando la guía metálica para que la altura de caída sea la misma (30.5 cm). Los golpes de pisón, se dan levantando éste hasta el nivel superior de la guía y dejándolo caer libremente.
6. Se vuelve a vaciar el material en el cilindro para tener una segunda capa que, agregada a la primera, de una altura total de 11 a 12 cm, compactándola del mismo modo que la primera (punto 5).
7. De la misma forma se procede con la tercera capa, procurando que una vez compactado el material, la superficie se encuentre 1 o 2 cm arriba del collarín o extensión.
8. Al terminar la compactación de las tres capas, se extrae el collarín/extensión, y con una espátula de cuchillo se recorre el perímetro interior para despegar el material, enrasando la muestra al nivel superior del cilindro.
9. Se pesa con la muestra compactada y se obtiene el peso del cilindro más el suelo ($W_{c-suelo}$).
10. Se toma una porción en la parte superior, medio e inferior de la muestra, se coloca en una cápsula de porcelana o vidrio refractario, se pesa en la balanza de 0.1 g de sensibilidad y se obtiene la tara más muestra húmeda para obtenerse el contenido de agua correspondiente.
11. Se desarma el cilindro con objeto de extraer fácilmente el material, devolviéndolo a la charola.
12. Se adiciona agua en cantidad suficiente para aumentar el contenido de humedad de un 2 a un 5%, dependiendo del tipo de material. Se repiten todos los pasos del 3 al 12, obteniéndose así un nuevo punto en la gráfica de humedad contra peso volumétrico seco. Para poder definir las condiciones óptimas del material, es necesario efectuar cuatro o cinco veces los pasos del 3 al 12, incrementándose en cada ensayo el contenido de agua hasta obtenerse al menos dos puntos en la rama seca y dos en la húmeda.
13. Todas las cápsulas que contienen la muestra húmeda en cada ensayo, se colocan dentro de un horno a 110 ± 5 °C, durante 18 - 24 h. Transcurrido este tiempo se retiran y se dejan enfriar obteniéndose la tara más la muestra seca.
14. Se encuentran los valores necesarios para construir la gráfica de pesos volumétricos secos contra el contenido de agua. De ella se definen los valores óptimos del material que corresponden al peso volumétrico seco óptimo (Ecuación 3.1) y su humedad (Ecuación 3.2).

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{1 + \omega} = \frac{W'_m}{1 + \omega}$$

Ecuación 3.1

donde:

- γ_d = Peso volumétrico seco [kg/m^3]
 W'_m = Peso de la muestra [kg]
 V'_m = Volumen de la muestra [m^3]
 ω = Contenido de humedad [% con respecto al peso del suelo]



$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

Ecuación 3.2

donde:

- ω = Contenido de humedad [%]
 W_w = Peso de la muestra húmeda [kg]
 W_s = Peso de la muestra seca [kg]

En la fase experimental de mecánica de suelos las pruebas de compactación se realizarán con las mediciones del equipo Próctor. En la etapa de experimentos de hidrogeoquímica se efectuarán pruebas de compactación en miniatura, por lo que se diseñará un molde (mini-Próctor), con la finalidad de reproducir la compactación que se obtenga en la fase experimental de mecánica de suelos. Por otra parte, en la fase experimental de hidrogeoquímica se analizarán diferentes sistemas de columnas (Capítulo 3.3). Cada sistema será diferente, por lo que cada una requerirá de un análisis para definir sus condiciones previas al experimento. A continuación se describe el cálculo teórico del molde mini-Próctor para la compactación en los experimentos de hidrogeoquímica.

Primera alternativa

El primer experimento se regirá a las condiciones siguientes:

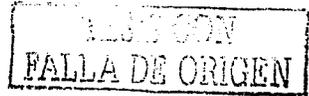
1. El gasto: $Q = 2.76 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{s}$
2. Compactación. El experimento requerirá de una energía de compactación de $2.90 \text{ kg}\cdot\text{cm}/\text{cm}^3$ (Capítulo 4.1.2) para obtenerse una permeabilidad alrededor de $1.58 \times 10^{-7} \text{ m/s}$. La Ecuación 3.3 refiere la energía de compactación en una prueba Próctor estándar.

$$E_c = \frac{N \times n \times h \times W}{V}$$

Ecuación 3.3

donde:

- E_c = Energía de compactación [$\text{kg}\cdot\text{cm}/\text{cm}^3$]
 N = Número de golpes
 n = Número de capas
 h = Altura de caída del pisón [cm]
 W = Peso del pisón [kg]
 V = Volumen de la muestra [cm^3]



De la Ecuación 3.3, para determinar el número de golpes se obtiene que "N" es igual a:

$$N = \frac{E_c V}{n \times h \times W}$$

Ecuación 3.4

Para adaptar el equipo de compactación a las necesidades del experimento con el objeto de reproducir una energía de compactación de $2.90 \text{ kg}\cdot\text{cm}/\text{cm}^3$, para obtenerse un coeficiente de permeabilidad de $1.58 \times 10^{-7} \text{ m/s}$, en un cilindro con dimensiones de 4.50 cm de diámetro por 9.00 cm de altura, se fabricó un pisón con un peso de 0.337 kg con una altura de caída libre de 10.00 cm

datos

$$\begin{aligned} E_c &= 2.90 \text{ kg}\cdot\text{cm}/\text{cm}^3 \\ h &= 10.00 \text{ cm} \\ W &= 0.337 \text{ kg} \\ V &= 143.14 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

Con los datos anteriores se propuso un número de capas (n) igual a 3, sustituyéndose los valores en la Ecuación 3.4 se obtiene lo siguiente:

$$N = 40 \text{ golpes por capa}$$

Por lo tanto la compactación en la columna de acrílico de 4.50 cm de diámetro por 9.00 cm de altura, se deberá de hacer 3 capas, y a cada una se le proporcionará 40 golpes uniformemente distribuidos, con la finalidad de obtener una conductividad hidráulica alrededor de $1.58 \times 10^{-7} \text{ m/s}$.

3. Porosidad. Esta propiedad se refiere a la relación existente entre el volumen de vacíos y el volumen de la masa, y se expresa como porcentaje. El tamaño y tipo de grano determinan los espacios vacíos entre las partículas y la movilidad de sustancias disueltas. La porosidad se determina con la Ecuación 3.5:

$$n = \frac{e}{1+e} \times 100 \quad \text{Ecuación 3.5}$$

donde:

$$\begin{aligned} n &= \text{Porosidad [\%]} \\ e &= \text{Relación de vacíos [adimensional]} \end{aligned}$$

La relación de vacíos se expresa como:

$$e = \omega S_s \quad \text{Ecuación 3.6}$$

donde:

$$\begin{aligned} \omega &= \text{Contenido de agua en suelo saturado [cm}^3/\text{g]} \\ S_s &= \text{Densidad de sólidos [g/cm}^3] \end{aligned}$$

Por lo que se tiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} \omega &= 0.1818 \text{ cm}^3/\text{g} \\ S_s &= 2.65 \text{ g/cm}^3 \text{ para arenas} \end{aligned}$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Sustituyendo en la Ecuación 3.6 se obtiene que:

$$e = \omega S_s = (0.1818)(2.65) = 0.48$$

y sustituyendo "e" en la Ecuación 3.5 se obtiene una porosidad de:

$$n = 33 \%$$

4. Contenido de humedad. Se refiere al contenido óptimo de agua para la compactación la cual fue determinada en el laboratorio, para un contenido del 10 % de adsorbentes naturales en la mezcla, la humedad óptima fue del 12.50 % (ver capítulo 4.1.1), por lo que para su saturación se requiere de un 18.18 % de agua con respecto al peso.

Segunda alternativa

La segunda alternativa del sistema de columnas considera las mismas condiciones de la primera alternativa, únicamente se modifican las dimensiones de la columna de 2.8 cm de diámetro por 3.0 cm de altura. Al realizar los cambios de dimensiones, se tiene un volumen diferente el cual modifica el número de golpes que se debe dar a cada capa, con el propósito de obtenerse la misma energía de compactación. A continuación se describe el cálculo para esta alternativa.

Compactación

Sustituyendo los siguientes datos en la Ecuación 3.4 y proponiendo el número de capas "n" de 2 se obtiene un número de golpes "N" de:

datos:

$$E_c = 2.90 \text{ Kg}\cdot\text{cm}/\text{cm}^3$$

$$h = 10.00 \text{ cm}$$

$$W' = 0.33766 \text{ kg}$$

$$V = 18.47 \text{ cm}^3$$

$$N = 7 \text{ golpes por capa}$$

Por lo tanto, para la compactación en la columna de jeringa de 2.8 cm de diámetro por 3.0 cm de altura, se deberán hacer 2 capas, y a cada una se le proporcionará 7 golpes uniformemente distribuidos, con la finalidad de obtenerse una conductividad hidráulica alrededor de 1.58×10^{-7} m/s.

3.2.3 Permeabilidad

La capacidad de un suelo para permitir que el agua infiltre recibe el nombre de permeabilidad. El coeficiente de permeabilidad "k" puede definirse como la velocidad del flujo producida por un gradiente hidráulico unitario.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El valor de "k" se usa como una medida de la resistencia al flujo ofrecida por el suelo, siendo los factores que intervienen los siguientes:

- La densidad de un suelo
- La distribución de tamaños de partícula
- La forma y orientación de partículas del suelo
- El grado de saturación / presencia de aire
- La viscosidad del agua del suelo, que varía con la temperatura

El intervalo de valores de "k" es muy amplio y se extiende desde 1×10^3 m/s en el caso de las gravas de granos muy gruesos, hasta un valor muy pequeño (1×10^{-7} m/s) en el caso de arcillas. En los materiales granulares, "k" varía en forma aproximadamente inversa con el valor de la superficie específica, pero en los suelos cohesivos, las relaciones son más complejas. En los suelos de arcilla hay factores importantes como el contenido de humedad y la temperatura, como también lo es la presencia de fisuras cuando se trata de la permeabilidad de grandes masas. La Tabla 3.5 muestra el intervalo de valores promedio de "k" para diversos suelos, incluyendo las condiciones de drenaje potencial.

Tabla 3.5: Constante de conductividad hidráulica para diferentes tipos de suelos

K[m/s]	Tipos de suelos		Drenaje
10^3	Gravas limpias		Muy buen drenaje
10^2			
1			
10^{-1}			
10^{-2}	Arenas limpias	Arcillas fisuradas y alteradas	Buen drenaje
10^{-3}	Mezclas grava-arena		
10^{-4}	Arenas muy finas		
10^{-5}	Limos y arenas limosas	Prácticamente impermeables	
10^{-6}	Limos arcillosos (>20% arcilla)		
10^{-7}	Arcillas sin fisuras		
10^{-8}			
10^{-9}			

Con la finalidad de determinar el coeficiente de conductividad hidráulica "k" en las muestras preparadas en las pruebas de compactación (Capítulo 3.2.1), se realizarán pruebas de conductividad hidráulica con el permeámetro de carga constante esquematizado en la Figura 3.2. Esta prueba se detalla en la norma ASTM D5084-2000.

Procedimiento

La mezcla del suelo previamente compactada con dimensiones de 10 cm de diámetro y 14 cm de altura, se somete a un proceso de labrado para disminuir el diámetro de la muestra a 7 cm y colocarla en los cabezales de la celda del permeámetro.

Para instalar la columna de suelo en la base de la celda de prueba, se coloca una piedra porosa seguida de un papel filtro en la parte superior e inferior, y se cubre la columna de

TESIS CON
FALLA DE OFICIO

suelo con una membrana de látex. Instalada la columna de suelo en la celda, es cerrada totalmente para evitar fugas, por una línea de confinamiento se conduce agua hacia la celda de prueba; la cual proporciona a la muestra una presión lateral de 10 kpa.

Posteriormente de colocar la columna en la celda y una vez que ésta se encuentra confinada por la presión lateral, se procede a saturar la columna de suelo. Cuando la muestra se encuentra saturada se determina la permeabilidad del suelo. Este procedimiento es realizado bajo diferentes columnas con sus respectivas cantidades de adsorbentes naturales.

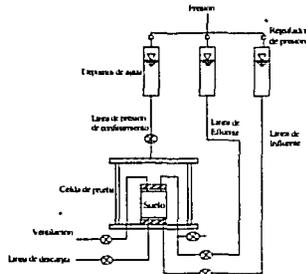


Figura 3.2: Permeámetro de carga constante

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.3 Hidrogeoquímica

Los objetivos específicos en esta fase experimental son los siguientes:

- Desarrollar una metodología para el estudio de desorción del contaminante.
- Probar que la inmovilización funciona bajo condiciones de flujo continuo.

3.3.1 Diseño e instalación de columnas de suelo

La infiltración de los contaminantes en el suelo, o la infiltración de los lixiviados en rellenos sanitarios, pueden afectar a la calidad del medio ambiente. Por ejemplo: la contaminación de las aguas subterráneas. Con el propósito de determinar el gasto de los lixiviados en esta fase experimental, se ensayaron diferentes alternativas en sistemas de columnas, para establecer un método práctico en el estudio de migración de contaminantes a través de una capa sellada de suelo contaminado para su reúso.

El procedimiento de prueba de migración de contaminantes, se puede ejecutar por medio de la prueba de permeabilidad "ASTM D5084-2000" con el uso de un permeámetro. Para el estudio de desorción de contaminantes en las columnas de suelo se utilizaron las mezclas elaboradas en la fase experimental de mecánica de suelos con diferentes cantidades de adsorbentes naturales (Capítulo 3.1.2) más la adición de un contaminante compuesto de material radioactivo (Cd^{2+} 109).

El uso de material radiactivo limita en gran manera poderse emplear el permeámetro del laboratorio de mecánica de suelos del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Por lo que, para desarrollar esta etapa de experimentos por restricciones de normas de seguridad radiológica se realizaron diversos ensayos alternativos con el propósito de establecer una metodología que cumpliera con los objetivos de este trabajo.

Preparación de columnas

Primera propuesta

El flujo de agua a través del suelo, es estudiado en la columna de suelo de 4.5 cm de diámetro y 9.00 cm de altura (Figura 3.3). Las columnas fueron diseñadas con material de acrílico. Por otro lado, se elaboraron columnas con la mezcla preparada en la fase experimental de mecánica de suelos, tomándose la mezcla con un contenido del 10 % de adsorbentes naturales.

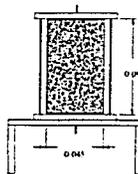


Figura 3.3: Dimensiones de la columna de la 1ª alternativa

El sistema en la primera alternativa, consta de la fabricación de la columna de suelo; posteriormente, la instalación con sus accesorios y al ensaye se le aplica un gradiente hidráulico como se observa en la Figura 3.4.

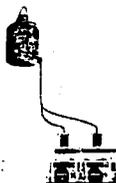


Figura 3.4: Primera alternativa

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Diseño teórico del experimento

La tecnología de inmovilización para su diseño requiere de una capa compactada con una permeabilidad de 1×10^{-9} m/s (U.S. EPA/530-SW-89-047, 1989 y TA-Siedlungsabfall, 1993). El diseño de un experimento requiere un tiempo de duración factible para su desarrollo, por lo que se necesita determinar la carga hidráulica necesaria para que el flujo infiltre la capa de suelo en un área de 1.59×10^{-3} m² y un espesor de 0.09 m.

La columna de suelo presenta un volumen de 1.43×10^{-3} m³ y una porosidad de 33 % (ver capítulo 3.2.2) que resulta en un volumen de 4.72×10^{-5} m³. El estudio de la desorción del contaminante necesita por lo menos dos lavados en la columna del suelo. Esto significa que para una duración máxima del experimento de 4 días se requiere un volumen de 9.438×10^{-5} m³ (94.38 mL), que deriva en un gasto mínimo de 2.77×10^{-10} m³/s (0.0166 mL/m).

Con la Ecuación 3.8 se determina el gradiente hidráulico para un coeficiente de permeabilidad de 1×10^{-9} m/s.

$$i = \frac{Q}{k \times A} \quad \text{Ecuación 3.8}$$

donde:

i = Gradiente hidráulico [adimensional]

Q = Gasto [m³/s]

k = Coeficiente de permeabilidad [m/s]

A = Área [m²]

datos

Q = 2.77×10^{-10} m³/s

k = 1×10^{-9} m/s

A = 1.59×10^{-3} m²

Sustituyendo valores en la Ecuación 3.8 se obtiene un gradiente hidráulico de:

$$i = 174$$

La carga hidráulica correspondiente al gradiente hidráulico de 174 y a un espesor de 0.09 m de la columna de suelo, se realizó con la finalidad que el flujo infiltre la columna de suelo, y fue determinada con la Ecuación 3.9.

$$h = id - d \quad \text{Ecuación 3.9}$$

donde:

h = Carga hidráulica [m]

i = Gradiente hidráulico [adimensional]

d = Espesor de la capa [m]

datos:

i = 174

d = 0.09 m

Sustituyendo valores en la Ecuación 3.9 se obtiene una carga hidráulica de: $h = 15.57$ m



Debido a que la carga hidráulica resultante de 15.57 m es un valor alto y difícil de montar en el laboratorio, no fue posible realizar el experimento de esta manera ya que el laboratorio sólo permite montar una carga hidráulica máxima de 1.10 m, por lo que la permeabilidad se realizará, ajustándose a las condiciones del laboratorio. El coeficiente de conductividad hidráulica es calculado con la Ecuación 3.10.

$$k = \frac{Q}{i \times A} \quad \text{Ecuación 3.10}$$

donde:

k = Coeficiente de permeabilidad [m/s]

Q = Gasto [m³/s]

i = Gradiente hidráulico [adimensional]

A = Área [m²]

Sustituyendo los siguientes valores en la Ecuación 3.10, se obtiene el coeficiente de permeabilidad " k " máximo, con el cual se realizará la parte experimental.

datos:

$Q = 2.77 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{s}$

$i = 13.22$

$A = 1.59 \times 10^{-3} \text{ m}^2$

El coeficiente de permeabilidad resulta de:

$k = 1.58 \times 10^{-7} \text{ m/s}$

En la Tabla 3.6 se presenta un resumen de los parámetros empleados para el diseño de experimento de la primera alternativa.

Tabla 3.6: Resumen de los parámetros de la 1ª alternativa

Parámetros	Cantidad
Flujo de entrada [m ³ /s]	2.77x10 ⁻¹⁰
Porosidad [%]	33.00
Compactación:	
Energía de compactación [kg·cm/cm ³]	2.90
Número de golpes por capa	40.00
Número de capas	3.00
Altura de caída del pisón [cm]	10.00
Peso del pisón [kg]	0.34
Volumen de la muestra [cm ³]	143.14
Conductividad hidráulica [m/s]	1.58x10 ⁻⁷
Carga hidráulica [m]	1.10
Gradiente hidráulico	13.22
Contenido de humedad [%]	12.50
La concentración del soluto [mg/L]	10,000.00

FALLA DE ORIGEN
 TRAZO CON

Preparación e instalación de la columna

La mezcla previamente seca es humedecida y compactada en la columna de acrílico. La energía de compactación se realizará de manera que resulte un coeficiente de permeabilidad de 1.58×10^{-7} m/s. Este valor fue obtenido previamente en pruebas de compactación de mecánica de suelos. Posteriormente a la columna del suelo, se le aplica una carga hidráulica con un flujo constante para su saturación, y con una pipeta volumétrica se adiciona un pulso de 2 mL de cloruro de sodio (NaCl) en la parte superior de la columna para que finalmente, se capturen los lixiviados para su estudio. En la Figura 3.5 se esquematiza el procedimiento.

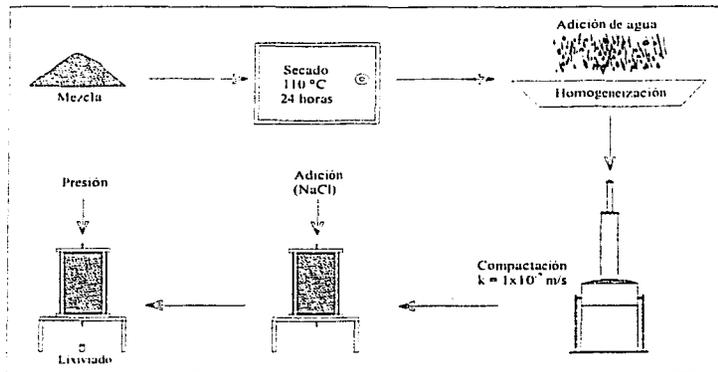


Figura 3.5: Metodología para evaluar la migración del cloruro de sodio (NaCl)

Segunda propuesta

En la segunda propuesta, los experimentos se realizarán en columnas de 2.8 cm de diámetro y 3 cm de altura. las columnas se fabricarán en una jeringa. La mezcla estará constituida de arena, bentonita cálcica y carbón activado con contenido del 10 % de adsorbentes naturales. Una vez elaborada la columna de suelo, se montará en un equipo semiautomático, y con una velocidad constante se le aplicará presión al agua hasta lograr que el flujo infiltre la capa de suelo de tal forma que la columna se sature como se observa en la Figura 3.6.



Figura 3.6: Segunda alternativa

Las condiciones de este experimento son similares al realizado en la primera propuesta por lo que a continuación se resume los parámetros de este sistema en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7: Resumen de los parámetros de la segunda propuesta

Parámetros	Cantidad
Flujo de entrada [m ³ /s]	1.07x10 ⁻¹⁰
Porosidad [%]	33.00
Compactación:	
Energía de compactación [kg.cm/cm ³]	2.90
Número de golpes	7.00
Número de capas	2.00
Altura de caída del pisón [cm]	10.00
Peso del pisón [kg]	0.34
Volumen de la muestra [cm ³]	18.47
Conductividad hidráulica [m/s]	1x10 ⁻⁷
Gradiente hidráulico	8.40
Contenido de humedad [%]	12.50
La concentración del soluto [mg/L]	10.000.00

Preparación e instalación de la columna

El procedimiento de la prueba de estudios de lixiviados se lleva a cabo en columnas de suelo empleando jeringas con una mezcla constituida de arena, bentonita cálcica y carbón activado. La mezcla preparada, y previamente secada se humedece y se compacta dentro de la jeringa, posteriormente se le adiciona el pulso (NaCl) en la parte superior de la columna. Con un velocidad constante se le aplica la presión por medio del equipo semiautomático con el propósito de que el agua se transporte hasta alcanzar la saturación del cuerpo de suelo. Finalmente, se recolectan los lixiviados para su estudio. El procedimiento se esquematiza en la Figura 3.7.

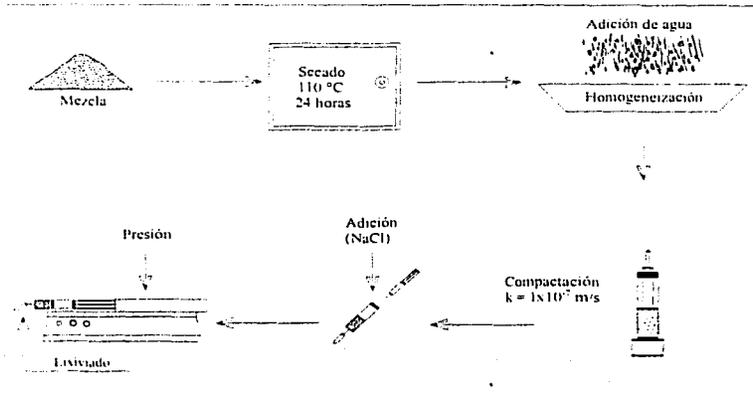


Figura 3.7: Metodología para evaluar la migración del cloruro de sodio (NaCl)

3.3.2 Desorción del Cd^{2+} en columnas de suelo para estudio de lixiviados

Los experimentos para el estudio de la desorción de contaminantes se realiza con la técnica de la dilución isotópica. Para ello, se utilizan diferentes mezcla de adsorbentes naturales (carbón activado y bentonita cálcica). A cada experimento se le hace al menos dos lavados, y se utilizan trazadores radiactivos de emisiones gama (γ) de cadmio (Cd^{2+} 109). La etapa de experimentos se divide de la siguiente manera.

Primera fase:

En esta fase se harán tres experimentos: El primero, se realizará con un contenido del 10 % de adsorbentes naturales (bentonita cálcica y carbón activado), el segundo con un 5 % de adsorbentes naturales y el tercero sin adsorbentes naturales.

Segunda fase:

En la segunda fase se harán dos experimentos: el primero se elaborará con un contenido del 5 % de carbón activado y finalmente se hará un experimento con un contenido del 5 % de bentonita cálcica.

Metodología:

Los adsorbentes naturales son mezclados con el suelo, posteriormente, se humedece la mezcla agregando el " Cd^{2+} " y el agua", y enseguida se procede a compactar el suelo haciendo dos capas. A cada una de las capas se le proporciona 7 golpes y se coloca la jeringa sobre el equipo semiautomático, con el objetivo de aplicar presión a la muestra de suelo, para que posteriormente, sean captados los lixiviados en un vial por cada 30 minutos. Finalmente, se lleva cada vial al contador gamma para determinar la concentración de los lixiviados. Adicionalmente, también se medirá el pH en cada experimento. En la Figura 3.8 se ilustra la mecánica a seguir en estas pruebas.

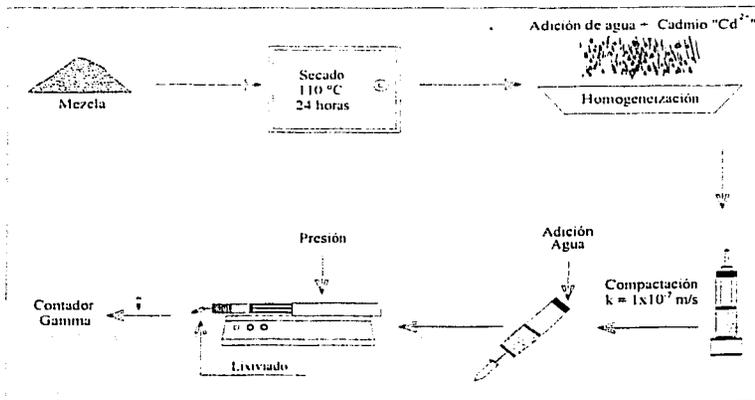


Figura 3.8: Metodología para evaluar la migración del Cadmio (Cd)

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

3.4 Estimación de costos para la aplicación de la tecnología

Mediante la inmovilización por adsorbentes naturales, el suelo contaminado es extraído por excavación, posteriormente, es mezclado con adsorbentes naturales (bentonita cálcica y carbón activado). En la estimación de costos de la tecnología, deben considerarse cada una de las actividades que engloban el poder llevar a cabo la construcción de la capa sellada, los costos específicos de cada proceso y la ubicación del área de trabajo. Los costos son variables de acuerdo a las condiciones del sitio contaminado (tipo de contaminante, ubicación, volumen, concentración del contaminante, etc), por lo que, para el propósito del presente trabajo se analizarán dos escenarios para su aplicación.

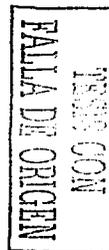
3.4.1 Escenarios

Escenario 1:

El primer escenario para su saneamiento por inmovilización, es un sitio contaminado con un área de 10,000 m² con dimensiones de 100 m por 100 m y el lugar se localiza a un 1 km de distancia del banco que proveerá los adsorbentes naturales. La capa sellada se construirá con material del mismo sitio. El suelo se encuentra constituido de arena y la profundidad máxima en que se encuentra el contaminante es de alrededor de 2.00 m.

Escenario 2:

El segundo escenario para su saneamiento por inmovilización, es un sitio con características similares al primero, modificando el proceso de construcción de la capa sellada con material arcilloso procedente de otro lugar. El análisis detallado de los costos de los escenarios es presentado en el capítulo 4.3.



4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Mecánica de suelos

El trabajo experimental de mecánica de suelos se realizó en el laboratorio del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA); Para ello, se utilizaron mezclas con diferentes cantidades de adsorbentes naturales como se describe en el capítulo 3.2.1.

El objetivo de esta fase experimental fue determinar el contenido óptimo de agua con el que se obtiene la compactación máxima; por lo que para esta finalidad se realizaron pruebas Proctor estándar con diferentes cantidades de humedad.

4.1.1 Determinación de la humedad óptima

Para obtener la humedad óptima con el cual es alcanzado el mayor peso volumétrico seco, se adicionan diferentes cantidades de agua al suelo, con la finalidad de obtener al menos dos puntos en la rama seca y otros dos en la rama húmeda, en la gráfica de la prueba de compactación (Figura 4.1). El peso volumétrico seco máximo y la humedad óptima se determinan en el punto de intersección de la rama seca y en la rama húmeda, trazando una línea horizontal y vertical hasta llegar a la abscisa y a la ordenada. Las lecturas en los ejes respectivos corresponde al peso volumétrico seco máximo y a la humedad óptima.

El primer experimento fue desarrollado con un contenido de 5 % de adsorbentes naturales en la mezcla, seguida por el de 7.5, 10 y 15 %. Las Figuras 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4, presentan los diferentes valores de humedad en las distintas cantidades de la mezcla con la cual se obtuvieron el peso volumétrico seco máximo.

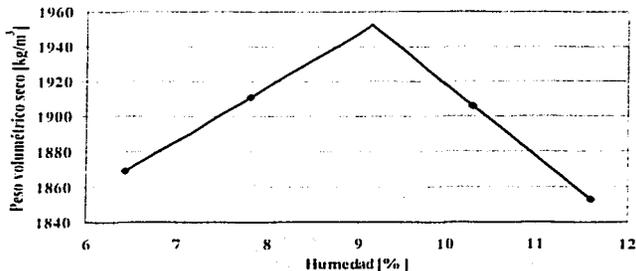
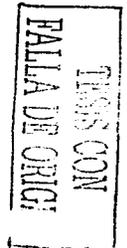


Figura 4.1: Peso volumétrico de la mezcla con un contenido del 5 % de adsorbentes naturales a diferentes humedades



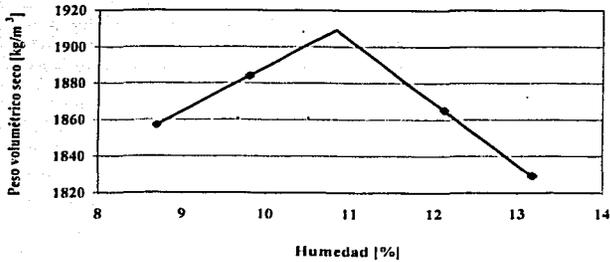


Figura 4.2: Peso volumétrico de la mezcla con un contenido del 7.5 % de adsorbentes naturales a diferentes humedades

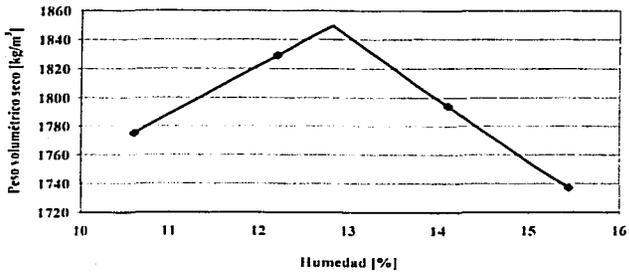


Figura 4.3: Peso volumétrico de la mezcla con un contenido del 10 % de adsorbentes naturales a diferentes humedades

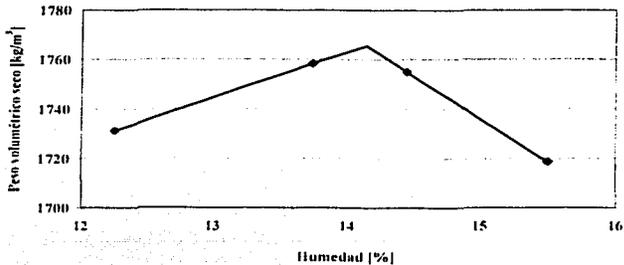


Figura 4.4: Peso volumétrico de la mezcla con un contenido del 15 % de adsorbentes naturales a diferentes humedades

PASOS CON
 FALLA DE ORIGEN

En la Figura 4.5 se presenta el contenido de humedad óptimo para las distintas cantidades de adsorbentes naturales de las mezclas. Se aprecia que, con mayor cantidad de adsorbentes naturales en la mezcla, la humedad óptima se ve incrementada de manera proporcional, debido al aumento de los adsorbentes naturales que absorben y retienen más agua que las arenas, por lo que se requiere un volumen mayor de agua para humedecer la mezcla.

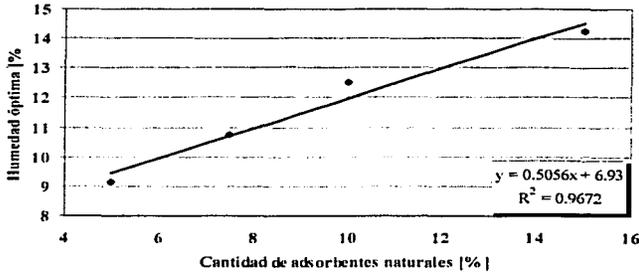


Figura 4.5: Humedad óptima para las diferentes mezclas

La Figura 4.6 presenta los resultados del peso volumétrico seco en las distintas cantidades de adsorbentes naturales en la mezcla. Con la prueba de compactación se obtuvieron diferentes pesos volumétricos secos máximos para cada contenido de adsorbentes naturales. Debido a que con una menor cantidad de adsorbentes se obtiene el mayor peso volumétrico seco: en la forma en que se incrementan los adsorbentes naturales, el peso volumétrico seco disminuye. Este resultado se explica debido a que el volumen de suelo es sustituido por agua en las mezclas que contienen más adsorbentes naturales, ya que la densidad específica del agua (1 mg/mL) es menor que la de los minerales del suelo (2.6 mg/cm³). Por lo que un alto contenido de agua provoca una disminución del peso volumétrico seco de la mezcla.

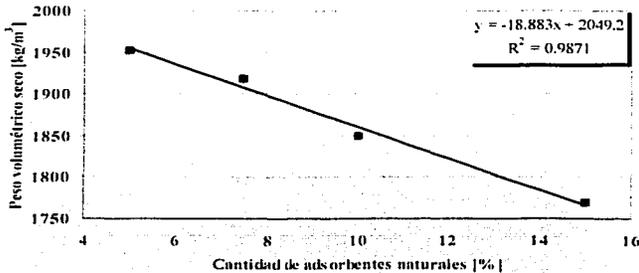


Figura 4.6: Peso volumétrico seco para las diferentes mezclas

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Los resultados de la prueba de compactación se resume en la Tabla 4.1. Por otro lado, se presentan el contenido óptimo de agua y el peso volumétrico seco en las distintas mezclas.

Tabla 4.1: Contenido de la humedad óptima y peso volumétrico seco

Cantidad de adsorbentes [%]	Humedad óptima [%]	Peso volumétrico seco [kg/m ³]
5.00	9.15	1952.52
7.50	10.77	1918.22
10.00	12.63	1849.08
15.00	14.23	1769.00

4.1.2. Determinación de la permeabilidad

La permeabilidad en las distintas mezclas, se determinó después de haber obtenido la humedad óptima para cada una de ellas. La columna de suelo se compactó con la humedad óptima, la cual se instaló en el permeámetro. Posteriormente, se procedió a saturar la columna de suelo, para que una vez saturada, se determinara la permeabilidad del suelo tomando lecturas del volumen desplazado a diferentes tiempos. Cuando existen diferencias significativas en las lecturas, la permeabilidad aún no es estable, de tal manera, que se continúa tomando lecturas hasta que el volumen desplazado se encuentra estable. La permeabilidad se calculó con el promedio de las lecturas en la fase en el que el volumen se encontrara estable. En el primer experimento se tomó la mezcla con un contenido de 5 % de adsorbentes naturales seguida por el de 7.5 y 10 %. Las Figuras 4.7, 4.8 y 4.9, presentan la permeabilidad medida en diferentes tiempos.

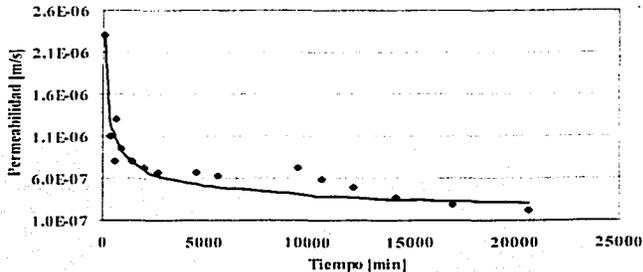


Figura 4.7: Variación de la permeabilidad con el tiempo para la mezcla compactada con un contenido del 5 % de adsorbentes naturales

TESIS CON
 FALTA DE ORIGEN

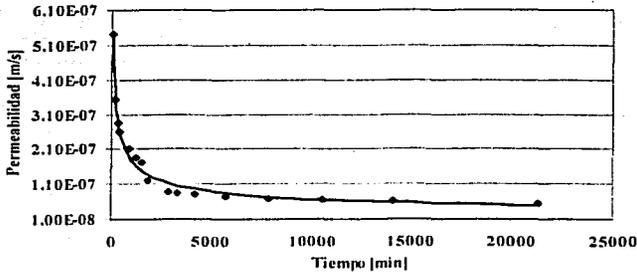


Figura 4.8: Variación de la permeabilidad con el tiempo para la mezcla compactada con un contenido del 7.5 % de adsorbentes naturales

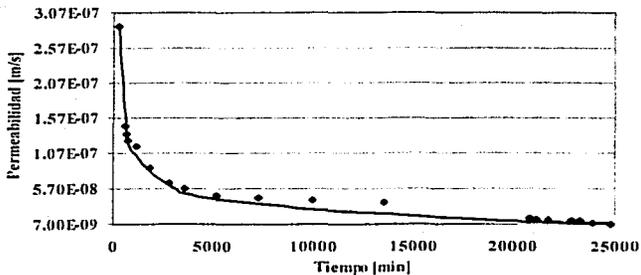


Figura 4.9: Variación de la permeabilidad con el tiempo para la mezcla compactada con un contenido del 10 % de adsorbentes naturales

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

La permeabilidad lograda en cada proporción de la mezcla se presenta en la Figura 4.10. Con la prueba de la permeabilidad, se obtuvieron diferentes conductividades hidráulicas para cada contenido de adsorbentes naturales. En menor cantidad de los adsorbentes en la mezcla se obtuvo una permeabilidad alta, en caso contrario, donde la cantidad de adsorbentes en la mezcla fue mayor, se obtuvo la menor permeabilidad. La conductividad hidráulica en la mezcla disminuye al aumentar el contenido de adsorbentes naturales.

Este resultado se explica, debido a que en suelos arenosos, los poros entre las partículas minerales son relativamente grandes, y por ello, la permeabilidad resulta comparativamente alta, en consecuencia, en suelos de tamaños menores, los poros y canaliculos entre los granos son más pequeños, por lo que estos son de menor permeabilidad, comportamiento que ocurre en la mezcla con mayor cantidad de adsorbentes naturales.

Debido a la adición de adsorbentes naturales en polvo, la mezcla con el suelo, provoca un cambio en la granulometría del sólido y en la conductividad hidráulica, y como consecuencia el gasto se reduce al disminuir la movilidad del agua por la presencia de granos finos.

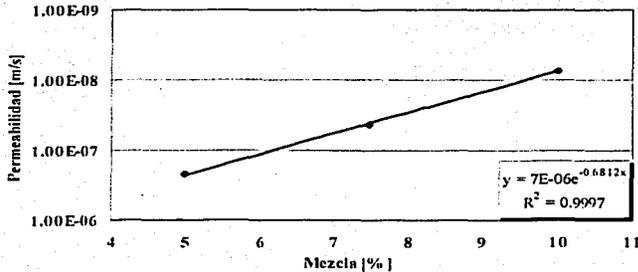


Figura 4.10: Permeabilidad para las distintas cantidades de mezcla

Los resultados de la prueba de permeabilidad se resume en la Tabla 4.2. En ella se presentan las distintas proporciones de la mezcla y su respectiva permeabilidad.

Tabla 4.2: Permeabilidad en cada mezcla

Cantidad de la mezcla [%]	Permeabilidad [m/s]	Energía de compactación [kg-cm/cm ³]
5.00	2.96×10^{-7}	2.90
7.50	6.12×10^{-8}	3.60
10.00	8.98×10^{-8}	4.79

TESIS CON
 FALTA DE ORIGEN

4.2 Hidrogeoquímica

En la fase experimental de hidrogeoquímica, se realizaron experimentos en columnas de suelo con una solución de cloruro de sodio y un contaminante compuesto de material radiactivo (Cd^{2+} 109).

Los objetivos específicos en esta fase experimental fueron los siguientes:

- Desarrollar una técnica para la investigación de la desorción de contaminantes en columnas de suelos.
- Analizar el transporte del contaminante a través del suelo y evaluar la ruta que sigue el flujo hasta lixiviar.
- Determinar si existe flujo preferencial que conduzcan al contaminante por una vía de transporte mas rápida en la columna de suelo.

4.2.1 Prueba de funcionamiento del diseño de experimento en columnas de acrílico

El sistema de columnas de acrílico necesita al menos dos lavados, para un tiempo de duración factible de 4 días en el estudio de lixiviados. El gasto que requiere es de $2.77 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{seg}$ ($0.016 \text{ mL}/\text{min}$). Se realizaron ensayos en columnas de suelo compactado en el sistema de acrílico con la finalidad de desarrollar un método funcional para la investigación de la inmovilización de contaminantes en suelos que contienen adsorbentes naturales.

Gasto en columnas de acrílico

Para probar el diseño teórico del experimento, se hicieron tres repeticiones de las pruebas, con el propósito de obtener un gasto constante superior al límite establecido ($0.016 \text{ mL}/\text{min}$). Los experimentos en el sistema de acrílico se realizaron con la aplicación de una carga hidráulica y una bomba de succión el cual arroja un gasto de $0.06 \text{ mL}/\text{min}$ con una presión de 1.7 bar. Las pruebas se efectuaron en columnas de suelo compactado en el sistema de acrílico con un 10 % de adsorbentes naturales "carbón activado y bentonita cálcica" en la mezcla. Los resultados obtenidos en los diferentes experimentos se presentan en las figuras 4.11, 4.12 y 4.13. Los datos del experimentos fueron los siguientes:

Prueba con pulso en la columna de acrílico

Concentración del pulso [mg/L]	10.000
Concentración del pulso [mg]	200
Volumen del pulso [mL]	2
Conductividad hidráulica [m/s]	1×10^{-7}
No de capas	3.00
No de golpes por capa	33.00

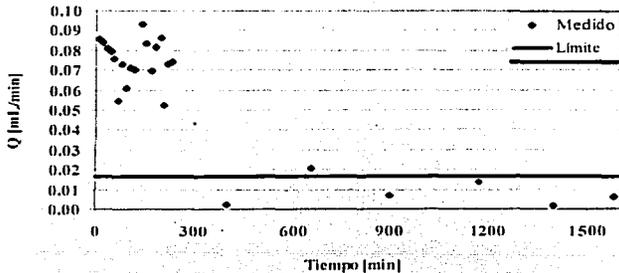


Figura 4.11: Gastos en columnas de acrílico a diferentes tiempos

FALTA DE ORIGEN
 TESTS CON

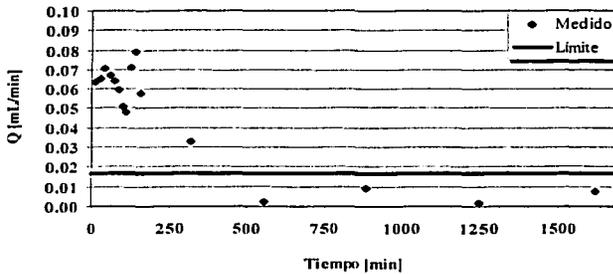


Figura 4.12: Gastos en columnas de acrílico a diferentes tiempos

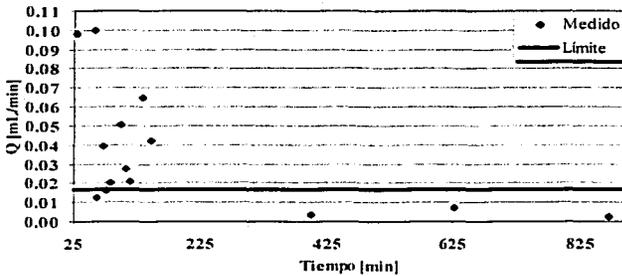


Figura 4.13: Gastos en columnas de acrílico a diferentes tiempos

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Los resultados obtenidos muestran una variación drástica del gasto durante un tiempo aproximado de 250 minutos, transcurrido este tiempo el gasto de 0.06 - 0.08 mL/min disminuye hasta rebasar el límite determinado en el experimento, obteniéndose gastos alrededor de 0.0019 mL/min, hasta fases del experimento dentro del cual no hay un volumen suficiente para desarrollar el estudio de lixiviados. La disminución del gasto se puede explicar en gran parte por el asentamiento de las partículas finas

4.2.2 Prueba de funcionamiento del diseño de experimento en columnas de jeringas

El sistema de columnas en jeringas necesita al menos dos lavados, para un tiempo de duración factible de 4 días en el estudio de lixiviados. El gasto que se requiere es de 0.022 mL/min. Por lo que se realizaron pruebas en columnas de suelo compactado con la finalidad de desarrollar un método funcional para la investigación de la inmovilización de contaminantes en suelos que contienen adsorbentes naturales.

Gasto en columnas de jeringa

Para probar el diseño teórico del experimento se hicieron tres repeticiones, con el propósito de obtener un gasto constante más alto al límite establecido (0.0022 mL). Los experimentos en este sistema se efectuaron con un equipo semiautomático el cual ejerce una presión al espécimen del suelo, arrojando un gasto de 0.038 mL/min con una presión de 0.0238 kg/m². Los ensayos se hicieron en jeringas con un 10 % de adsorbentes naturales de la mezcla. Los resultados obtenidos en los diferentes experimentos se presentan en las Figuras 4.14, 4.15 y 4.16.

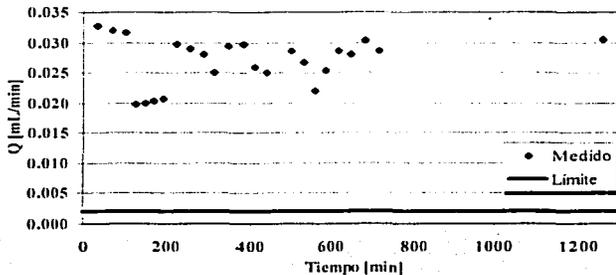


Figura 4.14: Gastos en columnas de jeringa a diferentes tiempos

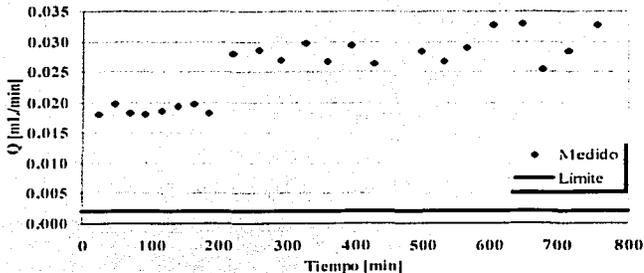


Figura 4.15: Gastos en columnas de jeringa a diferentes tiempos

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

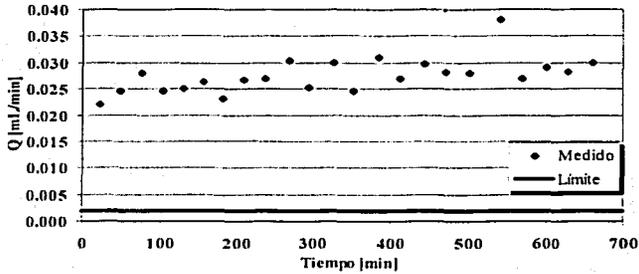


Figura 4.16: Gastos en columnas de jeringa a diferentes tiempos

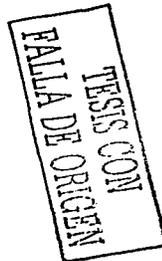
Los resultados en el sistema de columnas en jeringas derivan en un gasto promedio de 0.03 mL/min. Durante el desarrollo de cada experimento, los gastos obtenidos se encontraron por encima del límite establecido. Los ensayos efectuados cumplen en gran parte con los objetivos del experimento, por lo que este sistema se utilizó posteriormente en los experimentos de desorción de contaminantes para el estudio de lixiviados.

4.2.3 Pruebas de funcionamiento en columnas de suelo en jeringa con NaCl

El objetivo principal de estas pruebas fue analizar el transporte del flujo a través del suelo y de esta manera determinar si existe flujo preferencial que conduzca el contaminante por una vía de transporte más rápida. Para probar el funcionamiento del sistema de columnas de suelo en jeringas, se realizaron dos experimentos: El primero aplicando un pulso de cloruro de sodio (NaCl) en la parte superior de la columna y el segundo, saturando el suelo con la solución de cloruro de sodio.

Los datos del primer experimento son los mencionados a continuación:

Prueba con pulso en la columna de suelo	
Concentración del pulso [mg/L]	10.000
Concentración del pulso [mg]	27.50
Volumen del pulso [mL]	2.75
Conductividad hidráulica [m/s]	1×10^{-7}
No de capas	2.00
No de golpes por capa	14.00



El resultado del primer experimento con la aplicación de pulso se presenta en la Figura 4.17.

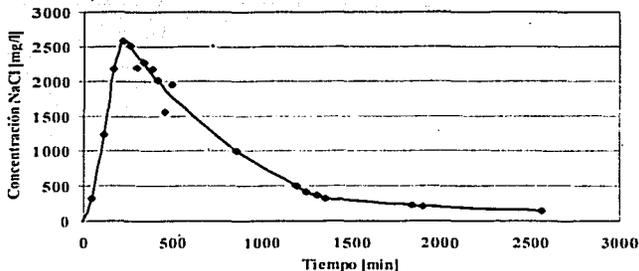
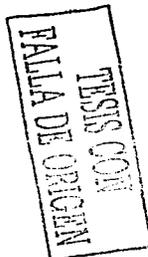


Figura 4.17: Transporte del cloruro de sodio (NaCl) con pulso, con un contenido del 10 % de adsorbentes naturales

El experimento inicia con una concentración baja a la salida de la columna de la solución de cloruro de sodio (NaCl). En el transcurso de la prueba, la concentración se incrementó hasta alcanzar un punto máximo y posteriormente, disminuyó. Este resultado explica un buen funcionamiento del sistema de columna en jeringa, ya que en las columnas donde aparentemente existen flujos preferenciales o la influencia del efecto pared (cavidades entre el suelo y la pared de la jeringa), el número de máximos de concentración se incrementan en la curva de salida, efecto que no se observa en esta prueba, por lo que resulta adecuado para realizar experimentos de transporte de contaminantes para el estudio de lixiviados. Por otra parte, la adsorción en este experimento, se considera insignificante y no se atribuye a ningún comportamiento al cloruro de sodio (NaCl) en la columna de suelo. La cantidad de cloruro recuperado a la salida de la columna fue de 25.98 mg, lo cual correspondió a un 94 % del cloruro agregado al inicio del experimento. El segundo experimento, con suelo saturado con la solución de cloruro de sodio (NaCl) presentó las mismas características del primero, modificando únicamente el volumen de la solución.

Prueba en la columna con suelo saturado

Concentración del pulso [mg/L]	10.000
Concentración del pulso [mg]	63.60
Volumen del cloruro de sodio [mL]	6.36
Conductividad hidráulica [m/s]	1×10^{-7}
No de capas	2.00
No de golpes por capa	14.00



El resultado del segundo experimento con el suelo saturado se presenta en la Figura 4.18.

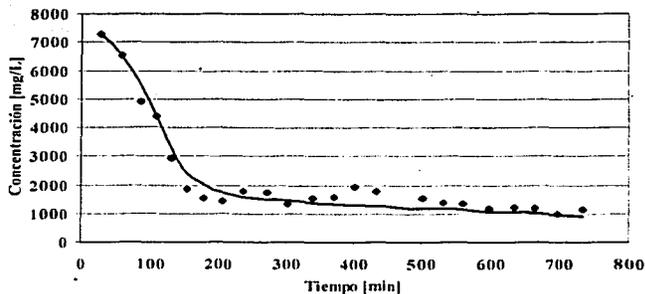


Figura 4.18: Transporte del cloruro de sodio (NaCl) en suelo saturado con un contenido del 10 % de adsorbentes naturales

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En el segundo experimento se observó una máxima concentración en la primera salida de la solución de cloruro de sodio en la prueba. En el transcurso del tiempo, la concentración disminuyó. Este resultado se presenta por la saturación del suelo con la solución de cloruro de sodio (NaCl). La curva experimental (Figura 4.18) no presentó diferentes máximos de concentración durante el transcurso de la prueba, la cual mostró un buen funcionamiento del sistema de la columna. Los flujos preferenciales y el efecto pared no se presentaron en esta prueba, por lo que resultó adecuado para realizar experimentos de transporte de contaminantes para el estudio de lixiviados. La cantidad de cloruro recuperado a la salida de la columna fue de 57.16 mg, el cual correspondió a un 90 % del cloruro agregado en la saturación del suelo. La adsorción, se considera insignificante y no se atribuye a ningún comportamiento debido al cloruro de sodio (NaCl) en la columna de suelo.

4.2.4 Desorción del Cd^{2+} en columnas de suelo para los estudios de lixiviados

La desorción del cadmio (Cd) para el estudio de los lixiviados se realizó en columnas de suelo con el sistema de jeringa descrito en el capítulo 4.2.3. Los experimentos se organizaron en dos grupos: En el primero se realizaron tres experimentos: El primero se efectuó con un contenido del 10 % de adsorbentes naturales, el segundo con un 5 % y el tercero sin adsorbentes naturales. Lo anterior se realizó con el objetivo de analizar la capacidad de la mezcla de bentonita cálcica y del carbón activado para inmovilizar el cadmio (Cd).

En el segundo grupo se realizaron dos experimentos: El primero de ellos se elaboró con un contenido del 5 % de carbón activado y el segundo con un 5 % de bentonita cálcica. Lo anterior, se realizó con el objetivo de analizar la capacidad de adsorción de la bentonita cálcica y el carbón activado para inmovilizar el cadmio (Cd).

En la Figuras 4.19, 4.20 y 4.21 se presentan los resultados del primer grupo de experimentos. En cada experimento se realizaron 3 lavados en la columna. En cada figura se presenta las curvas experimentales, la concentración de los lixiviados de cadmio fueron medidos en muestras que se recolectaron en diferentes tiempos. Las pruebas anteriores se difieren entre ellas por la cantidad de adsorbentes naturales. Los datos de cada grupo de los experimentos se presentan a continuación:

Datos del primer grupo de experimentos

Peso de la muestra en estado seco [g]	35.00
Cantidad de adsorbentes naturales "carbón activado y bentonita cálcica" [%]	10, 5 y 0
Cadmio radiactivo " ^{109}Cd " en suelo seco [cpm/columna]	7'955.361.00
Concentración del cadmio en suelo seco (mg/kg)	851.21
Humedad [%]	12.50
Energía de compactación [kg·cm/cm ³]	2.90
No de capas	2.00
No de golpes por capa	14.00

Datos del segundo grupo de experimentos

Peso de la muestra en estado seco [g]	35.00
Cantidad de adsorbentes naturales Carbón activado y bentonita cálcica [%]	5.00
Cadmio radiactivo " ^{109}Cd " en suelo seco [cpm/columna]	7'955.361.00
Concentración del cadmio en suelo seco [mg/kg]	851.21
Humedad [%]	12.50
Energía de compactación [kg·cm/cm ³]	2.90
No de capas	2.00
No de golpes por capa	14.00

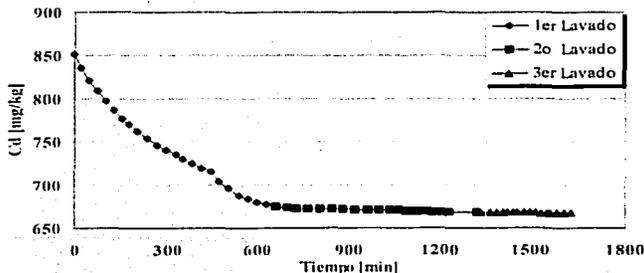


Figura 4.19: Desorción de cadmio con 10 % de adsorbentes naturales "carbón activado y bentonita cálcica"

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

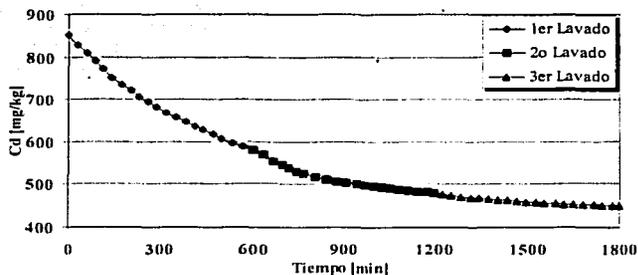


Figura 4.20: Desorción del cadmio con 5 % de adsorbentes naturales "carbón activado y bentonita cálcica"

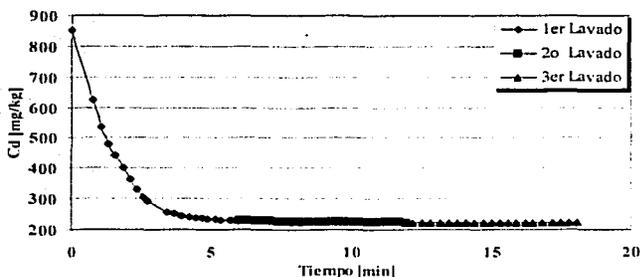


Figura 4.21: Desorción del cadmio sin adsorbentes naturales

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

En el primer grupo de experimentos, en la curva experimental de la primera prueba (Figura 4.19), se observa una concentración de cadmio alta en los lixiviados de la columna del suelo durante el primer lavado. En el transcurso de la prueba, este valor disminuye hasta llegar a un valor en el cual no se observa variación de la concentración. Más sin embargo, por la adición de los adsorbentes naturales (bentonita cálcica y carbón activado) en un 10 % en la columna de suelo, se logra la inmovilización del cadmio alrededor de un 79 %.

En el segundo experimento, al adicionarse un 5 % de adsorbentes naturales (bentonita cálcica y carbón activado) se obtiene una curva experimental (Figura 4.20), donde se observa la disminución de la concentración, hasta un valor en el que se mantiene uniforme. En esta prueba, los lixiviados se mantienen constantes en un tiempo mayor que en el primero debido a que en esta la cantidad de adsorbentes naturales son menores (5 %) con respecto al primero (10 %), debido a la cantidad menor de adsorbentes naturales (5 %) en la columna de suelo el contaminante agregado queda inmovilizado alrededor de un 52 %.

En el tercer experimento en el cual no se agregaron adsorbentes naturales (Figura 4.21), se observa una disminución drástica de la concentración de cadmio en un tiempo corto por la ausencia de adsorbentes naturales. Posteriormente, observó un mantenimiento estable. En esta prueba el cadmio en la columna de suelo lixivió alrededor de un 75 % en un periodo menor de tiempo, en comparación con los experimentos 1 y 2. Esto se explica, debido a que al no adicionarse ningún adsorbente natural, el mecanismo de inmovilización no funciona, de la misma manera, ya que las arenas no adsorben al contaminante.

En el primer grupo de experimentos la mayor inmovilización del cadmio con adsorbentes naturales en la columna de suelo se logró con un 10 % de la mezcla adicionada al suelo, en menor porcentaje de la mezcla, la inmovilización disminuyó, pero en el caso más crítico, en donde no se adiciona adsorbentes naturales, la inmovilización puede llegar a ser nula. En este caso, no llegamos a ese estado porque la prueba no se prolongo hasta alcanzar los valores mínimos posibles.

En el experimento en el cual no se emplean los adsorbentes naturales, se obtuvo la menor cantidad inmovilizada de cadmio, más sin embargo con el incremento de los adsorbentes naturales en el suelo, la inmovilización aumentó. En la Tabla 4.3 se presenta un resumen de los resultados obtenidos de la inmovilización de cadmio en las distintas mezclas de los experimentos.

Tabla 4.3: Porcentaje adsorbido

Mezcla [%]	Inmovilización [%]
10	79
5	52
0	20

Los resultados del segundo grupo de experimentos se presentan en las Figuras 4.22 y 4.23, las pruebas presentan las mismas características del primer grupo. Solamente que estos se realizaron únicamente con un adsorbente natural: Una con carbón activado y finalmente con bentonita cálcica con una cantidad del 5 % en ambas pruebas.

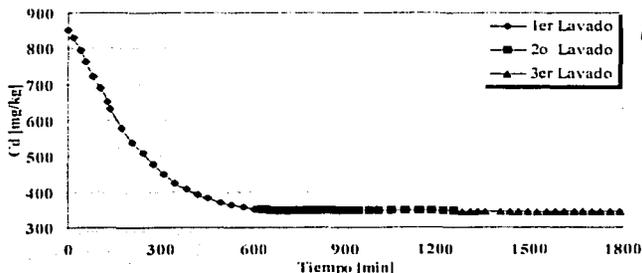
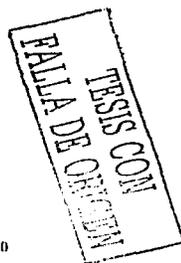


Figura 4.22: Desorción de cadmio con 5 % de carbón activado



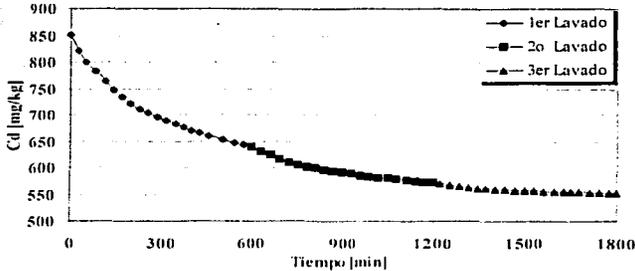


Figura 4.23: Desorción de cadmio con 5 % de bentonita cálcica

En el cuarto experimento (Figura 4.22) la curva de salida muestra como disminuyó la concentración de los lixiviados en la columna de suelo durante el primer lavado. Para el segundo y tercer lavado no se observaron variaciones drásticas manteniéndose constantes durante el desarrollo de la prueba. Al adicionar carbón activado en un 5 % en la columna de suelo se logró que el contaminante quedara inmovilizado alrededor de un 41 %.

En el quinto experimento (Figura 4.23) la salida de lixiviados en la columna de suelo se da de una manera lenta durante el primer lavado, prolongándose la reducción hasta el segundo y parte del tercer lavado. Finalmente se observó como se estabilizaba. En este experimento el contaminante queda inmovilizado alrededor de un 65 % debido a la adición de bentonita cálcica en un 5 %, lo cual prueba una capacidad mayor de adsorción para contaminantes inorgánicos en comparación al carbón activado.

La Tabla 4.4 presenta los resultados de la cantidad adsorbida en la columna de suelo con el carbón activado y la bentonita cálcica en un 5 %. Los resultados obtenidos muestran una capacidad mayor de adsorción de la bentonita cálcica para el cadmio.

Adsorbente [%]	Inmovilización [%]
Bentonita cálcica	65
Carbón activado	41

4.3 Estimación de costos para la aplicación de la tecnología

4.3.1 Escenarios

Escenario I:

El primer escenario para la rehabilitación por inmovilización, es un sitio contaminado con una superficie de 10.000 m² con dimensiones de 100 m por 100 m, el banco que proveerá



los adsorbentes naturales para la construcción de la capa sellada esta ubicada a un 1 km de distancia del área de trabajo. El suelo contaminado se encuentra constituido de arena, y la profundidad máxima en que se encuentra el contaminante es alrededor de 2.00 m. La mezcla para la construcción de la capa sellada se elaborará con material del mismo lugar, más la adición de un 10% de adsorbentes naturales. El espesor de la capa será de 50 cm. El saneamiento se llevará a cabo por medio de la construcción de una barrera en un sistema de encapsulación (Figura 4.24) del sitio contaminado con el objetivo de impedir el movimiento del contaminante.

El cálculo de costos en el proceso de construcción de una capa sellada engloba diferentes actividades; para éste caso particular el análisis de costos se efectúa con la técnica que comprende la excavación del material contaminado, el cual puede efectuarse con una retroexcavadora.

La mezcla puede elaborarse en el mismo sitio de construcción, depositando el material sobre la superficie y posteriormente con un arado de tractor se homogeniza el material de manera que los adsorbentes naturales se distribuyan lo más uniformemente posible. Otro proceso de mezclado puede ser, en el caso que el suelo se encuentre en estado húmedo, es la adición de los adsorbentes naturales para mezclarse, depositándose sobre la superficie de construcción de la capa sellada, esperando que el suelo alcance su humedad óptima para proceder a la compactación. El análisis de costo de la preparación de la mezcla es muy variable, ya que no existen experiencias a gran escala, por lo que es recomendable un estudio piloto previo a la aplicación en un escenario real.

El proceso de compactación puede ejecutarse con un compactador de rodillo liso o de orugas dependiendo del tipo de suelo, existe un equipo óptimo que permite lograr la especificación de manera adecuada. No obstante, que existen otras técnicas que se pueden examinar para cumplir con la normatividad.

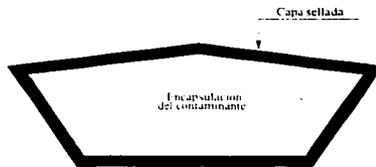
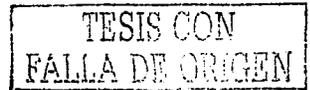


Figura 4.24: Sistema de encapsulación



Escenario 2:

El segundo escenario para la rehabilitación por inmovilización, es un sitio contaminado con una superficie de 10,000.00 m² con dimensiones de 100 m por 100 m, el banco que proveerá el material para la construcción de la capa sellada se sitúa a un 1 km de distancia del área de trabajo. El suelo esta constituido de arena y la profundidad máxima en que se

encuentra el contaminante es de alrededor de 2.00 m. La capa sellada se construirá con material fresco de tipo arcilla por su baja permeabilidad, con un espesor de 50 cm con la finalidad de cumplir con las normas de construcción.

El saneamiento se llevará a cabo por medio de la construcción de una barrera con un sistema de encapsulación (Figura 4.24) del sitio contaminado con el objetivo de impedir el movimiento del contaminante.

En la figura 4.25 se escenifica algunos de los principales procesos y componentes en la construcción de una capa sellada.

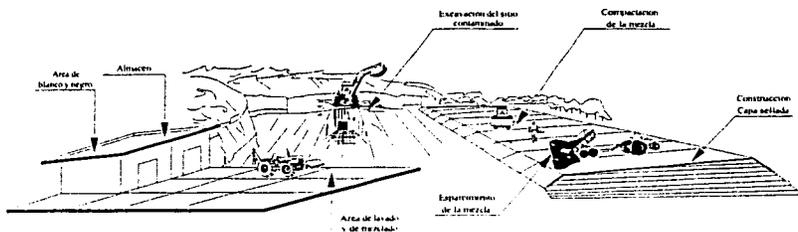


Figura 4.25: Escenario para la construcción de una capa sellada

Los datos básicos de proyecto en los escenarios se presentan a continuación

Datos	Escenario 1	Escenario 2
Área [m ²]	10,000.00	10,000.00
Profundidad [m]	2.00	2.00
Espesor de la capa [m]	0.50	0.50
Tipo de suelo	Arena	Arena
Contaminante	Cadmio	Cadmio
Volumen de suelo contaminado [m ³]	10,000.00	10,000.00
Volumen de excavación [m ³]	21,930.00	21,930.00
Volumen de la capa sellada [m ³]	10,681.00	10,841.00
Distancia al banco de material [km]	1.00	1.00

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4.3.2 Actividades

Las actividades específicas y volumen de obra en cada escenario son:

No	Actividades	Unidad	Escenario 1	Escenario 2
1.	Limpieza y trazo en áreas de trabajo	m ²	21,362.60	21,682.00
2.	Construcción de la cerca perimetral en el área contaminada	m	440.00	440.00
3.	Construcción de almacén para almacenar 50 % de la bentonita cálcica y carbón activado	m ²	250.00	
4.	Construcción del área de blanco y negro	m ²	24.00	24.00
5.	Construcción del área de lavado de equipo, maquinaria y herramienta	m ²	100.00	100.00
6.	Instalación de módulos sanitarias	Pieza	4.00	4.00
7.	Excavación del suelo	m ³	21,930.00	21,930.00
8.	Elaboración de la mezcla (arena, bentonita cálcica, carbón activado y agua)	m ³	10,681.30	
9.	Transporte de adsorbentes naturales 1 km	m ³	1,194.00	
10.	Transporte del material fresco (arcilla) 1 km	m ³		10,841.00
11.	Esparcimiento y homogeneización	m ³	10,681.30	10,841.00
12.	Riego de impregnación	m ²	21,362.60	21,682.00
13.	Compactación	m ³	10,681.30	10,841.00
14.	Relleno del material producto de excavación	m ³	12,323.30	19,759.00
15.	Compactación del material producto de la excavación	m ³	12,323.30	19,759.00
16.	Pruebas de control de la compactación de la mezcla	Lote	5.00	5.00
17.	Adquisición e implementos de seguridad	Juego	15.00	15.00

El precio unitario de cada actividad para los dos escenarios se describen en el anexo, por lo que aquí solamente se resume el costo por metro cúbico y por tonelada en cada escenario a diferentes distancias de suministro del material.

4.3.3 Análisis de costos

El objetivo del desarrollo del análisis de costos es evaluar los factores más importantes que intervienen en el cálculo de los costos específicos de los dos escenarios descritos anteriormente. Como se menciona en el capítulo 4.3.1 el factor más variable en el cálculo de costos para la inmovilización es la preparación de la mezcla por falta de experimento en escala piloto, por lo que se variaron los costos de construcción de la capa sellada en el primer escenario en tres casos (Tabla 4.5); el primero (1A) se cálculo con el precio de mercado de la bentonita cálcica para la preparación de la mezcla, el segundo caso (1B) se incrementó el costo de la preparación de la mezcla a un factor 1.50 con respecto al caso "1A", y el tercero (1C) se incrementó el costo de la preparación de mezcla a un factor 2.00 con respecto al caso "1A", con la finalidad de caracterizar la actividad más significativa de la inmovilización.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La tecnología de encapsulación tradicional (Escenario 2), con material fresco tipo arcilla procedente de otro lugar el costo de transporte y adquisición del material es el factor más significativo para la construcción de la capa sellada. En este escenario se calculó el tratamiento por inmovilización a diferentes distancias de suministro de la arcilla (Tabla 4.5).

El propósito del incremento de la elaboración de la mezcla en el primer escenario es representar el análisis de sensibilidad en la preparación de la mezcla, respecto a la adquisición y transporte de material fresco al sitio de trabajo del segundo escenario.

Tabla 4.5: Costos específicos para la construcción de la capa sellada

Distancia [km]	Escenario 1						Escenario 2	
	1A		1B		1C		2A	
	Costo [\$/m ³]	Costo [\$/ton]	Costo [m ³]	Costo [\$/ton]	Costo [\$/m ³]	Costo [\$/ton]	Costo [\$/m ³]	Costo [\$/ton]
1.00	57.63	29.55	89.21	45.75	120.79	61.94	59.79	32.11
5.00	57.84	29.66	89.42	45.86	121.00	62.05	61.64	33.11
10.00	58.11	29.80	89.69	45.99	121.27	62.19	63.90	34.32
15.00	58.37	29.94	89.95	46.13	121.53	62.32	66.16	35.54
20.00	58.64	30.07	90.22	46.27	121.80	62.46	68.42	36.75
30.00	59.17	30.34	90.75	46.54	122.33	62.73	72.95	39.18
40.00	59.70	30.61	91.28	46.81	122.86	63.00	77.47	41.61
60.00	60.76	31.16	92.34	47.35	123.92	63.55	86.51	46.47
80.00	61.82	31.70	93.40	47.89	124.98	64.09	95.56	51.33
100.00	62.87	32.24	94.45	48.44	126.03	64.63	104.60	56.18
150.00	65.52	33.60	97.10	49.80	128.68	65.99	127.22	68.33
200.00	68.17	34.96	99.75	51.15	131.33	67.35	149.82	80.47

1A * Con precio de mercado en la elaboración de la mezcla
 1B * Con un factor 1.50 de incremento respecto al caso 1A
 1C * Con un factor 2.00 de incremento respecto al caso 1A
 2A * Con material tipo arcilla adquirido de otro sitio
 \$ = precios en dólares

TESIS CON
 FALTA DE ORIGEN

El análisis de costos en el escenario 1A resultó el más económico para tratar el suelo contaminado por inmovilización, ya que se utiliza material del mismo sitio para la elaboración de la mezcla.

En el escenario 1B se incremento el costo a un factor 1.50 en la preparación de la mezcla, por lo que el costo para tratar el suelo contaminado por inmovilización resulta en un aumento considerable respecto al caso 1A.

En el escenario 1C se incremento el costo a un factor 2.00 en la preparación de la mezcla, por lo que el costo para tratar el suelo contaminado por inmovilización resulta el más elevado que en el primer escenario.

El escenario 2, por la adquisición y transporte de material tipo arcilla presenta un costo elevado respecto al caso 1A, por utilizar material fresco tipo arcilla procedente de otro lugar.

El resultado de los costos en los escenarios muestran una diferencia significativa debido al transporte y preparación de la arcilla para la conformación de la capa sellada del segundo

escenario. El adquirir el material a 1 km de distancia para el segundo escenario resultó en un aumento del 3 % con respecto al primer escenario (1A), por lo que el incremento en la distancia de suministro de material también aumentó el costo para tratar el suelo contaminado.

En la Figura 4.26 se observa que aproximadamente a los 64 km de transporte de material fresco se igualó el costo de construcción de la capa sellada si se considera un incremento de 1.50 en la preparación de la mezcla del primer escenario (1B). si, la preparación de la mezcla en el caso "1C" aumenta en un factor 2.00 respecto al caso "1A" el costo de construcción de la capa sellada se iguala alrededor de los 139 km.

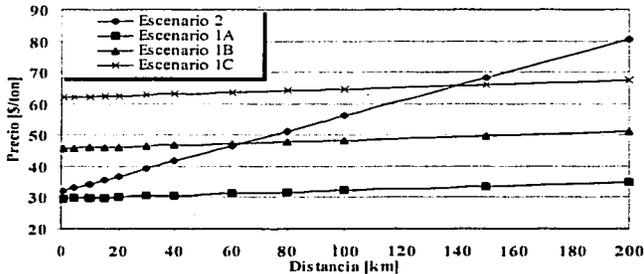


Figura 4.26: Costos para la construcción de la capa sellada

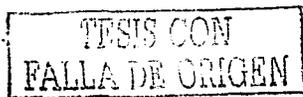
Por lo descrito con anterioridad para cada caso particular en el análisis de costos para tratar un suelo contaminado por inmovilización, es necesario analizar las variables más significativas de la tecnología dependiendo del sitio a tratar.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados en este estudio demuestran que la tecnología de inmovilización por adsorbentes naturales "bentonita cálcica y carbón activado" representan una opción atractiva para la rehabilitación de suelos contaminados que se pueden reusar como material de compactación, como por ejemplo para la construcción de capas selladas en rellenos sanitarios. En base a los resultados experimentales se citan las siguientes conclusiones:

- La conductividad hidráulica de un suelo arenoso (1×10^{-3} m/s) se puede reducir por la adición de un 10 % de adsorbentes naturales "bentonita cálcica y carbón activado" hasta valores cercanos a 8.98×10^{-9} m/s. La norma oficial mexicana NOM-084-ECOL-1994, que establece los requisitos para el diseño de un relleno sanitario y la construcción de sus obras complementarias, indican la construcción de una cubierta final de material natural o sintético, o bien alguna combinación de éstos, debiendo asegurar una permeabilidad mínima de 1×10^{-8} m/s con la finalidad de absorber o atenuar la infiltración de los lixiviados hacia los acuíferos. El resultado obtenido en pruebas de laboratorio con la mezcla de adsorbentes naturales con arena puede ser una herramienta útil, para alcanzar los requisitos de diseño en la cobertura final de un relleno sanitario.
- Los adsorbentes naturales "carbón activado y bentonita cálcica"; en un 10 % pueden disminuir la concentración del cadmio en un suelo contaminado por 851.21 mg/kg hasta valores cercanos a 667 mg/kg, que representa una inmovilización del 79 % del contaminante por los adsorbentes naturales, efecto que un material arenoso por sí sólo no es capaz de realizar, dependiendo de la concentración del contaminante en el suelo el grado de inmovilización puede variar.
- La inmovilización del cadmio por la adición en un 5% de bentonita cálcica resulta en un 65 %, mientras que el carbón activado puede inmovilizar un 41 % de cadmio. Este resultado muestra una mayor capacidad de inmovilización de la bentonita cálcica para contaminantes inorgánicos en comparación con el carbón activado.
- En un 5 % de adsorbentes naturales "carbón activado y bentonita cálcica", en un suelo contaminado por 851.21 mg/kg de cadmio se logra disminuir la concentración del contaminante hasta valores cercanos a 425 mg/kg, que representa una inmovilización de un 52%. Este resultado muestra una interferencia negativa del carbón activado, ya que la bentonita cálcica por sí sola es capaz de inmovilizar un 65 % del cadmio.



- El pH es un factor que influye en la inmovilización y del tipo de contaminante a tratar. Por ejemplo en metales catiónicos, la inmovilización es favorecida a pH altos; tal efecto ocurre con el cadmio tratado con bentonita cálcica, el cual presenta un pH alrededor de 6.90 presentando una mejor inmovilización del contaminante. El cadmio tratado con carbón activado presentó una menor inmovilización, tal efecto es causado en gran medida por el pH, ya que en este experimento el pH medido fue de alrededor de 5.11. Por lo anterior, es de gran importancia realizar estudios en cada suelo contaminado previo al diseño y aplicación de la tecnología de inmovilización.
- La aplicación de la tecnología de inmovilización puede ser empleada en el tratamiento de suelos contaminados, que se pueden reusar como material de compactación en la construcción de capas selladas y de esta manera disminuir el riesgo de infiltración de contaminantes móviles en concentraciones tóxicas hacia las aguas subterráneas.
- El análisis de costo por el escenario típico de aplicación de la tecnología de inmovilización resultó en un precio cercano de 280 - 305 pesos por tonelada de material tratado. Los costos obtenidos pueden variar para cada caso particular dependiendo de las características del escenario.
- Esta tecnología resulta atractiva para su aplicación por los suelos contaminados que se pueden tratar, ya que no presenta muchas restricciones para su aplicación en comparación a otras alternativas para saneamiento de suelos.
- Si un suelo contaminado recibe un tratamiento por inmovilización y posteriormente se reusa como material de compactación en la construcción de capas selladas en un relleno sanitario, se pueden lograr dos resultados positivos: En primer lugar se sanearía un área contaminado que puede integrarse al entorno natural y en segundo lugar, proveería material el cual ya no sería necesario explotar de otro sitio. Por lo que es necesario realizar un análisis de costos para este caso particular con la finalidad de definir la opción mas factible.
- Para la aplicación de la tecnología de inmovilización es necesario realizar un estudio piloto, con la finalidad de definir un proceso constructivo en gran escala, y la elaboración de la mezcla en grandes volúmenes, ya que en el presente trabajo se manejan pequeños volúmenes a nivel laboratorio.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

6. BIBLIOGRAFIA

- Afferden Van M., A. M. Hansen, P. Trejo, L. A. Barrera y R. Rubí, 1999. Desarrollo de una tecnología de inmovilización para el saneamiento de suelos y sedimentos contaminados. Proyecto interno TH 9901, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA, Jiutepec, Mor., México.
- Albert L., 1988, Curso Básico de Toxicología Ambiental. 2ª edición, 311p., Editorial Limusa, México, D.F., México.
- Asante D., 1996, Management of contaminated site problems. Lewis publisher, EEUUA.
- ASTM (American Standar Test Methods), D698-2000, Standar Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standar Effort., EEUUA.
- ASTM (American Standar Test Methods), D2488-2000, Standard Practice for Description and Identification of Soils (Visual- Manual Procedure),. EEUUA.
- ASTM (American Standar Test Methods), D5084-200, Standar Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter., EEUUA.
- Auvinet, G. e Hiriart, G., 1980. An artificial cooling pond for the Río Escondido coal fired power plant. Proceedings of the Symposium on Surface Water Impoundments, ASCE, Minneapolis, Minnesota.
- Auvinet G., 1998. Curso de geotecnia ambiental, Diseño y construcción de lagunas artificiales. Análisis de algunos casos en México., Comisión Nacional del Agua, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y Sociedad Mexicana de Mecánica de suelos, 76p., México, D.F., México.
- Badillo J., R. Rodríguez, 1997, Fundamentos de mecánica de suelos. Vol. 1, 18ª reimpresión de la 3ª edición. 642p., Editorial Limusa, México, D.F., México.
- Berezowsky M., R. Vilchis, 2000. Protección y control de causas. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y Comisión Nacional del Agua, 695p., México, D.F., México.
- Bölsing F., 1995, Meted of immobilizing contaminants in the soil or in materials similar to the soil. United States Patent 5,413,616.
- Calderón J. L., 1999, Profepa reconoce esfuerzo de académicos. Teorema, Vol 22, pp 56-57., México, D.F., México.
- Calvo Anta, 1996, Downloaded 2001, Contaminación por Metales Pesados. <http://edafologia.ugr/Conta/Tema15>.

- CNA, 1990, *Mecánica de suelos (Instructivo para ensaye de suelos)*. 1ª reimpresión, Colección de Breviarios del Agua, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 413p., México, D.F., México.
- Davis A., 2000, Chemical and engineering aspects of heavy metal contaminated soils. *Rev. Int. Contam. Ambient.*, Vol 16(4), Pp. 169-174.
- Department of Agriculture U.S.A., 1971, *Soil Conservation Service, Engineering Standard: Pond sealing or lining, soil dispersant*, Washington, D.C.
- Echeverri G., 1998, Aspectos Teóricos sobre el Fenómeno de Contaminación de Aguas Subterráneas. *Revista Universidad Eafit*. Julio-agosto-septiembre, Pp. 61-75, Cali, Colombia.
- EPA, 1974, An evaluation of tailings ponds sealants. *Environmental Protection Technology Series*. June, Washington, D.C.
- EPA 530-SW-86-031, USEPA, 1986. Office of solid Waste and Emergency Response, *Technical Guidance Document: Construction Quality Assurance for Hazardous Waste Land Disposal Facilities*, Washington, D.C.
- EPA 540/R-94/043, USEPA, 1994. *Common Cleanup Methods at Superfund Sites*, Washington, D.C.
- Eweis J. B., S. J. Ergas, D. P. Chang y E. D. Schroeder, 1999, *Principios de Biorrecuperación*. 1ª edición, Editorial Mc Graw Hill, 321p., Madrid, España.
- Faschan A., Titlebaum M., Cartledge f., 1994, *Nonionic organic partitioning onto organoclays*. Ibib. 11., NY, EEUUA.
- Fitz Patrick EA, 1985, *Suelos. Su Formación, Clasificación y Distribución*. 2ª Impresión. 136 p., Compañía Editorial Continental, México D.F., México.
- García I., Dorronsoro C., Downloaded 2001. *Contaminación por Metales Pesados. De las redes*: <http://edafologia.ugr/Conta/Tema15>.
- Grathwohl P., Einsele G., 1993, Vergütung mineralischer Dichtungen zum Rückhalt organischer Schadstoffe. *Offenlegungsschrift DE 4300915 A1*.
- Hinkle, R.D. y Dixon, S., 1978. *Impermeable asphalt concrete pond liner*, Civil Engineering-ASCE, New York.
- HWRSM (Hazardous Waste Site Remediation Management), 1994, *A special publication prepared by Task Force Hazardous Waste Site Remediation*, New York.

- Jaramillo J., 1991, Guía para el Diseño, Construcción y Operación de Rellenos Sanitarios. Serie técnica No 28, Organización Panamericana de la Salud y Organización Mundial de la Salud, 214p., Washintong, D.C.
- Jiménez B., 2001, La contaminación ambiental en México. Causas, efectos y tecnología apropiada. 1ª edición, Editorial Limusa, 925p., México, D.F., México.
- Kays W.B., 1997, Construction of Linings for Reservoirs, Tank and Pollution Control Facilities. New York, USA.
- Kleinken A., 1997, Auswertung der Erfahrungen aus durchgeführten Sicherungsverfahren bei Altlasten. In: LUA NRW (ed) Materialien zur Altlastensanierung und zum Bodenschutz. Band 3.
- Kruse K., 1997, Process for immobilizin organic and inorganic pollutants in a contaminated soil material on a remediation site. United States Patent 5,651,831.
- Kühnert M., Fuchs V., Golbs S., Knauf H., 1993, Verfahren zur Herstellung von Huminsäure-Metall-Verbindungen, deren Verwendung als Adsorptions-und/oder Entgiftungsmittel bzw. als Spurenelementquelle. Offenlegungsschrift, DE 4129872 A1.
- Mitchell J.K., 1965, Permeability of Compacted Clay, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE. Vol. 54, No sm1, New York, EEUA.
- Nelson N., B. Scott, 1987, Toxic Chemicals, Healt and Environment. Capitulo 9, Editado por Lave, L.B. y Upton, A.C. Baltimore, MD: Johns Hopkins University Press.
- NOM-083-ECOL-1994, Norma oficial mexicana, Condiciones que deben reunir los sitios destinados a relleno sanitario para la disposición final de los residuos sólidos municipales. México, D.F., México.
- NOM-084-ECOL-1994, Norma oficial mexicana, Requisitos para el diseño de un relleno sanitario y la construcción de sus obras complementarias. México, D.F., México.
- NOM-XXX-ECOL-2000, Norma oficial mexicana, borrador adaptado para la construcción y diseño de un relleno sanitario. México, D.F., México.
- Rollings, M.B. y Dylla, A.S., 1971, Bentonite sealing methods compared in the field, Journal of the Irrigation and Drainage Division, Proceedings ASCE, Vol 96, No. IR2, June, New York.
- SASySH, 2001, Sección Americana de Salud y Servicios del Humano la Agencia de Servicio de Salud Pública para las Substancias Tóxicas y Registro de la Enfermedad. de las redes: <http://www.atsdr.cdc.gov/tfacts5.html>.

- Scheffer, Schachtschabel, 1988, Lehrbuch der Bodenkunde, 14 Auflage von, Ed. Enke, 494p. Germany.
- Semarnap/PROFEPA, 1998, Informe Trianual de Sitios Abandonados e Ilegales con Residuos Peligrosos, 1995-1997, México, D.F., México.
- Silva T. F., P. C. Repetto, 2000, Geotechnical Engineering for Enviromental Control. X PANAM, Pp 253-251, México, D.F., México.
- Sims R. C., 1990, Soil Remediation Techniques at Uncontrolled Hazardous Waste Sites, J. Air Waste Management Association, Vol. 40, No. 5, Pp 704-732.
- Suthersan, Shutan S., 1997, Remediation Engineering Design Concepts, Lewis Publishers.
- Tabla periódica, 2001. De las redes: http://www.mcgrawhill.es/Tabla_periodica/elemento48html.
- TA-Siedlungsabfall. 1993 Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen (Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz - TA Siedlungsabfall), BAnz. Nr. 99a vom 14. Mai 1993.
- TAUW Umwelt GmbH, 1996, Immobilisierung von Schadstoffen in Altlasten. In: Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (ed) Materialien zur Altlastenbehandlung 1/1996.
- Tchobanoglous G., H. Theisen y S. Vigil, 1994, Gestión Integral de Residuos Sólidos, volumen 1, 1ª Edición, 607p., Editorial Mc Graw Hill, USA.
- Whitlow, R., 1994, Fundamentos de Mecánica de Suelos, 2ª edición, 589p., Editorial CECSA, México, D.F., México.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ANEXO: Precios unitarios

I. Actividades preliminares

Concepto	Unidad	Cantidad	Precio	Costo
1. Limpieza y trazo en áreas de trabajo	m ²	1.00	4.84	4.84
Precio unitario	m²			4.84

Concepto	Unidad	Cantidad	Precio	Costo
2. Construcción de la cerca perimetral en el área contaminada Suministro e instalación de malla galvanizada de 55 x 55 mm, 2.5 m de altura, con soportes y alambre incluyendo puertas	m ²	1.00	87.24	87.24
Precio unitario	m			87.24

II. Construcción e instalación de infraestructura

Concepto	Unidad	Cantidad	Precio	Costo
3. Construcción de almacén para la bentonita cálcica y carbón activado	m ²	1.00	908.50	908.50
Precio unitario	m²			908.50

Concepto	Unidad	Cantidad	Precio	Costo
4. Construcción del área de blanco y negro	m ²	1.00	951.58	951.58
Precio unitario	m²			951.58

Concepto	Unidad	Cantidad	Precio	Costo
5. Construcción del área de lavado de maquinaria				
Trazo y nivelación	m ²	1.00	4.84	4.84
Plantilla de concreto f _c = 150 kg/cm ² , de 10 cm de espesor	m ³	0.10	1,206.35	120.64
Precio unitario	m²			125.48

Concepto	Unidad	Cantidad	Precio	Costo
6. Instalaciones sanitarias				
Instalación de módulos sanitarios	Pieza	1.00	1,035.00	1,035.00
Precio unitario	Pieza			1,035.00

**TRABAJOS CON
FALLA DE ORIGEN**

III. Construcción de la capa sellada

Concepto	Unidad	Cantidad	Precio	Costo
7. Excavación del suelo	m ³	1.00	10.13	10.13
Precio unitario	m³			10.13

Concepto	Unidad	Cantidad	Precio	Costo
8. Elaboración de la mezcla incluye materiales "arena, bentonita cálcica, carbón activado y agua"	m ³	1.00	300.00	300.0
Precio unitario	m³			300.0

Concepto	Unidad	Cantidad	Precio	Costo
9. Transporte de adsorbentes naturales Carga y acarreo hasta 1 km.	m ³ /km	1.00	8.37	8.37
Precio unitario	m³/km			8.37

Concepto	Unidad	Cantidad	Precio	Costo
10. Transporte del material fresco tipo arcilla Carga y acarreo hasta 1 km	m ³ /km	1.00	8.37	8.37
Precio unitario	m³/km			8.37

Concepto	Unidad	Cantidad	Precio	Costo
11. Esparcimiento y homogeneización Cargador frontal	m ³	1.00	10.13	10.13
Precio unitario				10.13

Concepto	Unidad	Cantidad	Precio	Costo
12. Riego de impregnación con pipa	m ²	1.00	10.85	10.85
Precio unitario	m²			10.85

Concepto	Unidad	Cantidad	Precio	Costo
13. Compactación de la mezcla Compactación al 95% de Proctor	m ³	1.00	63.70	63.70
Precio unitario	m³			63.70

Concepto	Unidad	Cantidad	Precio	Costo
14. Relleno del material producto de la excavación	m ³	1.00	10.13	10.13
Precio unitario	m³			10.13

Concepto	Unidad	Cantidad	Precio	Costo
15. Compactación del material producto de la excavación				
Compactación al 95% de Proctor	m ³	1.00	63.70	63.70
Precio unitario	m³			63.70

IV. Control de calidad

Concepto	Unidad	Cantidad	Precio	Costo
16. Pruebas de control de la compactación de la mezcla	Lote	1.00	5,000.00	5000.00
Precio unitario				5000.00

V. Implementos de seguridad

Concepto	Unidad	Cantidad	Precio	Costo
17. Adquisición e implementos de seguridad (overol, guantes, botas, casco mascara de seguridad)	Juego	1.00	300.00	300.00
Precio unitario				300.00

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN