



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERÍA

**CONTAMINACIÓN DEL SUELO POR LIXIVIADOS
PROVENIENTES DE SITIOS DE DISPOSICIÓN
FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
I N G E N I E R O C I V I L
P R E S E N T A
DALIA GUILLERMINA SALDIERNA VALDÉS



MÉXICO, D.F.

2002



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

PAGINACIÓN

DISCONTINUA



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
FING/DCTG/SEAC/UTIT/112/01

Señorita
DALIA GUILLERMINA SALDIERNA VALDÉS
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **M.I. CONSTANTINO GUTIÉRREZ PALACIOS**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

**"CONTAMINACIÓN DEL SUELO POR LIXIVIADOS PROVENIENTES DE SITIOS DE
DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES"**

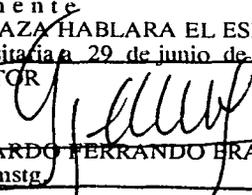
INTRODUCCION

- I. ANTECEDENTES**
- II. ASPECTOS BÁSICOS DE LOS RELLENOS SANITARIOS**
- III. CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR LIXIVIADOS**
- IV. SANEAMIENTO DE SUELOS CONTAMINADOS POR LIXIVIADOS**
- V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universidad a 29 de junio de 2001
EL DIRECTOR


M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO
GFB/GMP/mstg

Dedicatoria

A mis padres con cariño y respeto por el esfuerzo que representa dar la vida a un ser humano. Por el esfuerzo que hicieron por darnos educación. Por el cariño que siempre nos han manifestado a mí y a mis hermanos.

A mis hermanos, cuñados y sobrinos con mucho cariño, por ser parte importante en mi vida.

A todas aquellas personas que han sido parte esencial en mi vida, con cariño, que sin el apoyo de ellas no se hubiera realizado éste trabajo.

Agradecimientos

A Dios por darme la vida.

A mis padres Socorro y Luis por el apoyo que siempre me han brindado y por ser un gran ejemplo de superación.

A mis hermanos Gina, Gaby, José Luis, Carlos, Guadalupe y Evelia, por demostrarme que siempre podré contar con ellos.

A mis sobrinos Itzel, Ricardo, Valeria, Fernando, Diego y Gabriel por ser un aliciente para seguir superándome.

A Arturo por el gran apoyo que me ha brindado.

A Lilia por ser una gran amiga y estar en todo momento.

A León por demostrarme el significado de la palabra amistad.

A Jesús por los buenos consejos que siempre me dio.

A todos mis amigos de la universidad que siempre estuvieron en la buenas y en las malas conmigo.

Al M.I. Constantino Gutiérrez Palacios, por dedicarme su valioso tiempo para la realización de este trabajo.

A los sinodales por su valioso tiempo y sus comentarios acertados.

A la Ing. Graciela Paredes por sus comentarios, libros y ayuda, los cuales fueron de mucha utilidad para este trabajo.

A la M.I. Ana Elisa Martínez por su tiempo para orientarme sobre algunos temas que se trataron en este trabajo.

A Todos que de alguna forma u otra manera han contribuido a mi formación.

Lista de tablas	viii
Lista de figuras	ix
Introducción	xi

CAPITULO I. ANTECEDENTES

1.1	Residuos sólidos	2
1.1.1	Antecedentes históricos.	2
1.1.2	Características generales de residuos sólidos.	4
1.1.2.1	Clasificación	4
1.1.2.2	Composición física.	4
1.1.2.3	Características físicas.	5
1.1.2.4	Composición química.	7
1.2	El ciclo de los residuos sólidos municipales.	9
1.2.1	Generación.	9
1.2.2	Almacenamiento.	9
1.2.3	Pretratamiento.	10
1.2.4	Recolección.	10
1.2.5	Transporte primario.	10
1.2.6	Transporte secundario.	10
1.2.7	Separación simultánea.	10
1.2.8	Transferencia.	10
1.2.9	Tratamiento.	11
1.2.10	Disposición final.	11
1.3	Métodos de disposición	11
1.3.1	Relleno sanitario.	11
1.3.2	Incineración.	13
1.3.3	Generación de composta o composteo.	13
1.4	Contaminantes comunes	14
1.4.1	Características de los contaminantes.	15
1.5	Lixiviados	17
1.5.1	Tipos de lixiviados.	18
1.6	Afectación ambiental al medio	19
1.7	Contaminación del suelo por lixiviados.	20

CAPITULO II. ASPECTOS BÁSICOS DE LOS RELLENOS SANITARIOS

2.1	Definiciones	24
2.2	Normatividad actual.	29
2.2.1	Norma Oficial Mexicana NOM-083-ECOL-1996.	29
2.2.1.1	Especificaciones	30
2.2.1.1.1	Aspectos generales.	30
2.2.1.1.2	Aspectos hidrológicos	32
2.2.1.1.3	Aspectos geológicos.	32
2.2.1.1.4	Aspectos hidrogeológicos.	32
2.2.1.2	Procedimientos	33
2.2.1.2.1	Estudios geológicos	33
2.2.1.2.2	Estudios hidrogeológicos.	33
2.2.2	Norma Oficial Mexicana NOM-084-ECOL-1994	35
2.2.2.1	Diseño de un relleno sanitario.	35
2.2.2.1.1	Topografía	36

2.2.2.1.2	Cantidades y características de los residuos sólidos.	37
2.2.2.1.3	Selección del método.	37
2.2.2.1.4	Requerimientos volumétricos.	37
2.2.2.1.5	Cálculo de la capacidad volumétrica.	37
2.2.2.1.6	Cálculo de la vida del sitio.	37
2.2.2.1.7	Dimensiones de la celda diaria.	38
2.2.2.1.7.1	Criterio constructivo método de área.	39
2.2.2.1.7.2	Criterio constructivo método de trinchera.	39
2.2.2.1.8	Obras complementarias	40
2.2.2.1.9	Áreas de acceso y espera	40
2.2.2.1.10	Cerca perimetral.	41
2.2.2.1.11	Caseta de vigilancia	41
2.2.2.1.12	Caseta de pesaje y báscula.	41
2.2.2.1.13	Camifos.	41
2.2.2.1.14	Área de emergencia.	42
2.2.2.1.15	Drenaje.	43
2.2.2.1.16	Instalación de energía eléctrica.	44
2.2.2.1.17	Señalamiento.	44
2.2.2.1.18	Sistema de impermeabilización.	44
2.2.2.1.19	Sistema de captación y extracción de lixiviados.	44
2.2.2.1.20	Pozos de monitoreo para lixiviados.	45
2.2.2.1.21	Sistema de captación de biogas	45
2.2.2.1.22	Sistema de monitoreo para biogas.	45
2.2.2.1.23	Área de amortiguamiento	45
2.2.2.1.24	Almacén y cobertizo.	46
2.2.2.1.25	Área administrativa.	46
2.3	Proyecto de relleno sanitario	46
2.3.1	Metodología de selección del sitio	47
2.3.1.1	Identificación y evaluación de zonas de estudio.	47
2.3.1.2	Identificación de sitios potenciales.	47
2.3.1.3	Evaluación y cribado de los sitios potenciales.	48
2.3.1.4	Selección final del sitio.	48
2.3.2	Diseño de rellenos sanitarios.	48
2.3.2.1	Determinación de las cantidades y características de los residuos sólidos por disponer.	49
2.3.2.2	Recopilación de información para el sitio.	49
2.3.2.3	Diseño del área de relleno.	50
2.3.2.4	Elementos de diseño.	50
2.3.2.5	Preparación del diseño.	51
2.4	Construcción	54
2.4.1	Etapas para la preparación y construcción del sitio.	54
2.4.2	Requerimientos de compactación.	55
2.4.3	Suelo ideal para el sitio.	56
2.4.4	Construcción de la sub-base.	56
2.4.5	Construcciones de capas.	57
2.4.5.1	Construcción de capas con arcilla y con suelo-bentonita.	57
2.4.5.2	Construcción de capas con membrana sintética.	58
2.4.5.3	Construcción de mantos de drenaje con arena	59
2.5	Operación y mantenimiento	61
2.5.1	Control de acceso y operación de báscula.	62
2.5.2	Almacenamiento de residuos en el sitio	62

2.5.3	Prácticas de disposición de residuos.	63
2.5.4	Uso de maquinaria.	65
2.5.5	Inspección y supervisión.	66
2.5.6	Mantenimiento y servicio.	68
2.5.7	Revisión y reparación de equipo.	68
2.5.8	Caminos interiores.	69
2.5.9	Báscula.	69
2.5.10	Cerca perimetral	70
2.5.11	Oficinas generales y áreas de servicio.	70
2.5.12	Mantenimiento de áreas verdes.	70
2.5.13	Mantenimiento del sistema de monitoreo.	70
2.5.14	Vigilancia.	70
2.5.15	Cobertura final.	71
2.6	Control de contaminantes	71
2.6.1	Reacciones biológicas.	71
2.6.2	Reacciones químicas.	71
2.6.3	Reacciones físicas.	72
2.6.4	Hundimientos y asentamientos diferenciales.	72
2.6.4.1	Control de asentamientos.	73
2.6.5	Lixiviados.	73
2.6.5.1	Tratamiento de lixiviados.	76
2.6.5.2	Sistema de tratamiento de lixiviados.	77
2.6.5.3	Recirculación del lixiviado	77
2.6.5.3.1	Irrigación por aspersión.	77
2.6.5.3.2	Flujo superficial.	77
2.6.5.3.3	Irrigación por inyección.	77
2.6.6	Biogas.	78
2.6.6.1	Sistemas de control activo.	80
2.6.6.2	Sistemas pasivos de control.	80
2.6.7	Monitoreo ambiental del relleno sanitario.	81
2.6.8	Parámetros.	84

CAPITULO III. CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR LIXIVIADOS

3.1	Composición de los suelos	87
3.1.1	Características del suelo.	87
3.1.2	Propiedades químicas del suelo.	88
3.1.2.1	pH.	88
3.1.2.2	Conductividad eléctrica.	89
3.1.2.3	Nutrientes.	89
3.1.3	Propiedades físicas del suelo.	89
3.1.3.1	Textura.	89
3.1.3.2	Estructura.	90
3.1.3.3	Densidad.	90
3.1.3.4	Porosidad.	90
3.1.3.5	Consistencia.	90
3.1.3.6	Color.	90
3.1.4	Propiedades edafológicas.	90
3.1.4.1	Clasificación por unidades.	92
3.1.4.1.1	Clasificación por subunidades	93
3.1.4.1.2	Clasificación por grupos.	94

3.1.4.2	Descripción de términos técnicos.	96
3.1.5	Clasificación de suelos.	100
3.1.6	Ley de Darcy.	102
3.1.7	Coefficiente de permeabilidad.	103
3.1.8	Tiempo de filtración	104
3.2	Marco legal	105
3.2.1	Contaminación de suelo	105
3.2.1.1	Ley General Del Equilibrio Ecologico Y La Protección Al Ambiente.(LGEEPA)	105
3.2.1.1	Título cuarto protección al ambiente	105
3.2.2	Restauración de suelos	109
3.3	Procesos de contaminación	110
3.3.1	Operaciones unitarias.	113
3.3.1.1	Advección.	113
3.3.1.2	Dispersión.	114
3.3.1.3	Difusión.	114
3.3.1.4	Estratificación por densidad.	114
3.3.1.5	Flujo de fluidos en fase no acuosa.	114
3.3.1.6	Flujo medio fracturado.	115
3.3.2	Procesos químicos.	115
3.3.2.1	Reacciones de oxidación y reducción	115
3.3.2.2	Intercambio de iones.	116
3.3.2.3	Complejización.	117
3.3.2.4	Precipitación.	117
3.3.2.5	División en fase inmisible.	118
3.3.2.6	Absorción.	118
3.3.3	Procesos biológicos.	118
3.3.3.1	Degradación aeróbica.	119
3.3.3.2	Degradación anaeróbica.	119
3.3.3.3	Cometabolismo.	119
3.3.3.4	Absorción biológica.	119
3.3.4	Ecuaciones de traslado.	121
3.4	Cálculo de la generación de lixiviados	123
3.5	Efectos de la contaminación	143
3.5.1	Impactos adversos.	143
3.5.2	Impactos potenciales.	144

CAPITULO IV. SANEAMIENTO DE SUELOS CONTAMINADOS POR LIXIVIADOS

4.1	Bases del saneamiento.	151
4.1.1	Metodología para la evaluación de suelos contaminados.	152
4.1.1.1	Fuente de contaminación.	152
4.1.1.2	Parámetros por considerar.	152
4.1.1.3	Parámetros para evaluar la magnitud y extensión de la contaminación.	152
4.1.1.4	Parámetros para caracterizar suelos e hidrogeología.	152
4.1.1.5	Parámetros para definir los niveles de limpieza.	153
4.1.1.6	Estrategia del muestreo.	153
4.1.1.6.1	Tipo de muestreo.	153
4.1.1.6.2	Vapores.	153
4.1.1.6.3	Agua.	154

4.1.1.6.4	Suelo.	154
4.1.1.6.5	Ubicación de los puntos de muestreo.	154
4.1.1.6.6	Número de punto de muestreo.	155
4.1.1.7	Definición de los niveles de limpieza.	155
4.1.1.7.1	Tratamiento físico.	155
4.1.1.7.2	Tratamiento químico.	156
4.1.1.7.3	Tratamiento biológico.	156
4.1.1.7.4	Tratamiento térmico.	156
4.2	Técnicas de confinamiento	157
4.2.1	Sistema de cubierta.	157
4.2.1.1	Protección superficial.	157
4.2.1.2	Capa de drenaje.	157
4.2.1.3	Capa o sellos de arcilla compactada y geomembranas	158
4.2.1.4	Capa drenante de recolección de gases.	158
4.2.2	Pantallas impermeables o paredes de aislamiento.	158
4.2.2.1	Pantallas impermeabilizantes base de lechadas.	158
4.2.2.1.1	Lechada suelo - bentonita	159
4.2.2.1.2	Lechada cemento - bentonita	159
4.2.2.2	Pantallas estructurales de concreto.	159
4.2.2.3	Pantallas por inyección de cemento (sistema Jet Grouting)	159
4.3	Técnicas de tratamiento in situ.	160
4.3.1	Sistemas de extracción por vapor.	161
4.3.2	Lavado del suelo o flujo con soluciones surfactantes (soil flusing).	162
4.3.3	Estabilización y solidificación.	163
4.3.4	Vitrificación.	167
4.3.5	Barreras electrocinéticas.	169
4.3.6	Biorrestauración.	170
4.3.6.1	Bioventeo.	171
4.3.6.2	Bioestimulación	172
4.3.6.3	Tratamiento de suelo (biolabranza in situ).	172
4.4	Técnicas de tratamiento ex situ.	173
4.4.1	Lavado de suelo con surfactantes (soil washing).	173
4.4.2	Desorción térmica.	175
4.4.3	Extracción con solventes.	176
4.4.4	Deshalogenación química.	176
4.4.4.1	Deshalogenación con glicolatos.	177
4.4.4.2	Descomposición catalizada por bases.	177
4.4.5	Biorrestauración.	177
4.4.5.1	Biorrestauración en fase de lechada.	177
4.4.5.2	Biorrestauración en fase sólida.	178
4.4.5.2.1	Tratamiento del suelo.	178
4.4.5.2.2	Biopilas.	178

CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1	Conclusiones.	181
5.2	Recomendaciones	182

BIBLIOGRAFÍA	185
---------------------	------------

LISTA DE TABLAS

TABLA		PAG.
1.1	Composición física de residuos sólidos	5
1.2	Contenido de humedad de residuos sólidos	6
1.3	Densidad de residuos sólidos sin compactar	7
1.4	Componentes de residuos sólidos (análisis aproximado)	7
1.5	Análisis final de los residuos sólidos (% de peso seco)	8
1.6	Contenido de energía de los residuos sólidos	9
1.7	Composición de los lixiviados.	17
2.1	Residuos sólidos municipales.	37
2.2	Rango de población	40
2.3	Criterios básicos para caminos	42
2.4	Tipos de equipo	65
2.5	Mantenimiento preventivo	69
2.6	Descomposición de los residuos sólidos	72
2.7	Líneas directrices para instalaciones de control de lixiviados	75
2.8	Componentes de biogas	79
2.9	Parámetros indicadores para monitoreo de lixiviados	85
2.10	Parámetros indicadores para monitoreo de biogas	85
3.1	Nutrientes comunes.	89
3.2	Clasificación de los suelos por medio del tamaño de sus partículas	101
3.3	Convención para la identificación de los suelos basándose en la Proporción de sus fracciones	102
3.4	Coefficientes de permeabilidad.	104
3.5	Procesos naturales que afectan el traslado de sustancias contaminantes	113
3.6	Cationes Intercambiables en 100 g de suelo seco (pH 6.85)	117
3.7	Relación de microorganismos capaces de eliminar metales y su tasa de eliminación	120
3.8	Producción de gas	126
3.9	Producción de lixiviados	142
3.10	Impactos ambientales en un relleno sanitario	144

LISTA DE FIGURAS

FIG.		PAG.
1.1	Ciclo de residuos sólidos municipales	12
2.1	Esquema de un relleno sanitario	29
2.2	Diagrama de flujo establecido en la NOM-083-ECOL-1996	31
2.3	Gráfica de la evaluación potencial de la contaminación para determinar si un sitio es apto	35
2.4	Relleno sanitario por método de trinchera	52
2.5	Relleno sanitario por método de área	53
2.6	Relleno sanitario por el método combinado	53
2.7	Gráfica espesor de la capa - número de pasadas del compactador - densidad del residuo compactado	55
2.8	Detalle de la zanja para recolección de lixiviados con membrana sintética	60
2.9	Morfología de la celda diaria	64
2.10	Compactación de capas de residuos sólidos	65
2.11	Arreglo de pozos para monitoreo de aguas subterráneas	82
2.12	Esquema de pozos para monitoreo de aguas subterráneas	82
2.13	Batería de pozos para monitoreo de lixiviados	83
2.14	Batería de pozos para monitoreo de biogas	83
3.1	Triángulo de textura	102
3.2	Coefficientes de permeabilidad K	106
3.3	Origen de los fluidos lixiviados en un relleno sanitario	111
3.4	Consecuencias de la difusión en el traslado de sustancias contaminantes sin transporte advectivo	115
3.5	Esquema de flujo saturado	116
3.6	Volumen de control bidimensional	121
3.7	Arreglo del balance de agua	127
3.8	Gráfica de la producción de lixiviados	142
4.1	Pantalla impermeabilizante a base de lechada cemento - bentonita	160
4.2	Sistema de extracción por vapor	162
4.3	Lavado del suelo o flujo con soluciones surfactantes	164
4.4	Método de estabilización y solidificación	167

4.5	Método de vitrificación	169
4.6	Barrera electrocinética	171
4.7	Método de biorrestauración	173
4.8	Método de biorrestauración (Biopilas)	179

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la gran cantidad de residuos sólidos generados, constituye un grave problema en cuanto su disposición, cada día es más difícil contar con espacios disponibles que, al ser utilizados como sitios de disposición final, aseguren el menor impacto.

El manejo de los residuos sólidos se resume a un ciclo que comienza con la generación y la acumulación temporal, continuando con la recolección, transporte, transferencia y terminando con la disposición final de los mismos. Es a partir de la disposición final cuando los problemas ambientales se recrudecen, ya que estos sitios de disposición final se convierten en focos permanentes de contaminación.

Los sitios de disposición final causan problemas que afectan al suelo, al agua y al aire; la capa vegetal original de la zona desaparece, hay una erosión del suelo, contamina a la atmósfera con materiales inertes y microorganismos. Con el tiempo, alguna parte de ellos se irá descomponiendo y dará lugar a nuevos componentes químicos que provocarán la contaminación del medio, provocando que el suelo pierda muchas propiedades originales, como su textura, porosidad, permeabilidad, intercambio catiónico, concentración de macro y micronutrientes.

La contaminación de los suelos ha recibido menos atención que la contaminación del aire y el agua. La contaminación del suelo es un fenómeno de mayor duración y con grandes consecuencias para el aire y el agua, sin embargo, un suelo contaminado es, en general, el producto de procesos graduales, largos en el tiempo. La contaminación del suelo por lixiviados se debe a la filtración de éstos en los sitios de disposición final en donde, aun con todos los procesos que se tienen para su control, en el caso de rellenos sanitarios, se pueden filtrar por debajo del relleno ocasionando que se contaminen las aguas subterráneas, así como se afecte la salud de los seres humanos al entrar en contacto con ellos.

Las tecnologías más utilizadas para la rehabilitación de suelos contaminados se pueden llevar a cabo tanto en el mismo sitio del problema como fuera de él; tratamiento *in situ* y tratamiento *ex situ*, y se dividen en *on site* (el suelo es excavado y tratado en el mismo terreno) y en *off site* (se requiere excavación, transporte del material contaminado y tratamiento adecuado en un lugar distinto de donde se encuentra el suelo contaminado). Así mismo, estas tecnologías, se clasifican de acuerdo con el tipo de operación unitaria o proceso aplicado en: físicas, químicas y biológicas. El costo que representa la aplicación de las tecnologías de rehabilitación es muy elevado y no se ha tomado conciencia de que es más costoso limpiar que controlar la contaminación o evitarla.

El problema de la contaminación del suelo por lixiviados no ha recibido la debida atención, si bien en países como Estados Unidos, Francia, Alemania, etc., se han desarrollado técnicas para el tratamiento de estos residuos, en

nuestro país es muy escaso el trabajo de investigación y de aplicación práctica que se ha realizado al respecto.

La idea básica de este trabajo de tesis es dar a conocer en forma general el problema de la contaminación de los suelos por lixiviados, ya que es un gran problema ambiental que no ha tenido la difusión necesaria para controlarla o evitarla, ni se le ha dado la importancia que tiene.

Este trabajo es teórico, no se realizó estudios prácticos en ningún sitio; por lo que éste es la reunión de un acervo bibliográfico que contribuye a la comprensión del problema de la contaminación del suelo por lixiviados y a dar una solución a éste por medio de tecnologías de saneamiento.

A continuación se define el marco teórico sobre el cual se elaboró esta propuesta. La tesis está constituida por cinco capítulos principales los cuales se describen brevemente a continuación:

Capítulo I. Antecedentes

En este capítulo como su nombre lo indica, se presentan los antecedentes, para comprender mejor el problema de la contaminación del suelo por lixiviados, siendo éste un punto de partida para los capítulos II, III, IV; se presenta un resumen histórico de los residuos sólidos municipales así como sus características generales, también una síntesis de los métodos de disposición final que existen, de los contaminantes que afectan al ambiente, de las características principales de los lixiviados, de los efectos ambientales sobre el suelo y de la contaminación de los suelos por lixiviados.

Capítulo II. Aspectos básicos de los rellenos sanitarios

En este capítulo se expone uno de los métodos de disposición final que tiene gran capacidad de almacenamiento de residuos sólidos, el relleno sanitario, su diseño, construcción, operación y mantenimiento, así como la normatividad que lo rige; también se describe el control de los contaminantes que se generan con éste método de disposición los cuales son principalmente: los lixiviados y el biogás.

Capítulo III. Contaminación de suelos por lixiviados

En éste capítulo se describe la composición básica de los suelos, lo cual ayuda a conocer las características sobresalientes de éstos; se exponen los procesos de contaminación y los efectos de la misma, al igual que la normatividad que lo estipula; se presenta un ejemplo del cálculo analítico de la generación de los lixiviados.

Capítulo IV. Saneamiento de suelos contaminados por lixiviados

En éste capítulo se describen las bases del saneamiento de los suelos contaminados, así como las técnicas en general más utilizadas para este fin, las cuales se dividen en técnicas de confinamiento que regularmente se utilizan cuando no existe la posibilidad de recuperación del suelo, las técnicas de tratamiento in situ y las de tratamiento ex situ, son aquellas que pueden rehabilitarse en el mismo sitio del problema como fuera de él respectivamente.

Capítulo V. Conclusiones y recomendaciones

En éste capítulo, se presentan las conclusiones principales y recomendaciones que se consideran pertinentes para enriquecer la práctica profesional y la difusión del conocimiento de la contaminación del suelo por lixiviados.

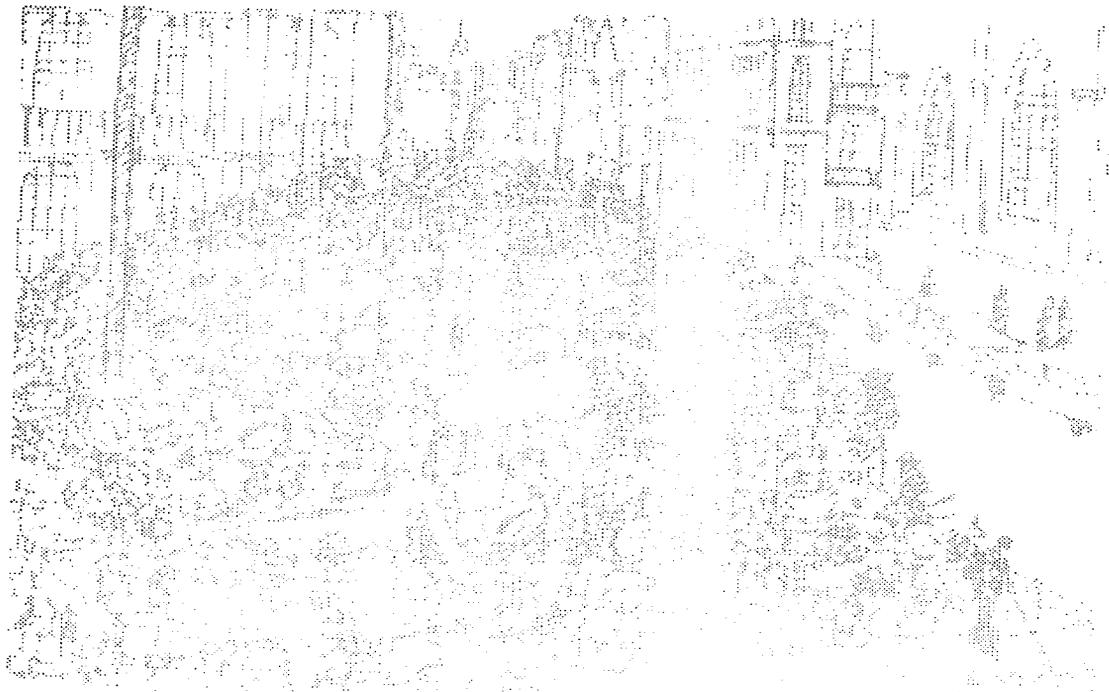
OBJETIVO

Describir el problema de contaminación del suelo por lixiviados, así, como analizar y presentar soluciones para el control de dicha contaminación.

ALCANCES

Los alcances de este trabajo son:

- ✦ Mediante la búsqueda bibliográfica, recopilar y analizar la información relativa a la contaminación de los suelos, principalmente debido a lixiviados que se generan en sitios de disposición de residuos sólidos municipales.
- ✦ Presentar y describir en forma general y sintetizada los problemas de contaminación del suelo por lixiviados, así como alternativas de tratamiento de esos suelos contaminados.



CAPÍTULO I
ANTECEDENTES

1.1 RESIDUOS SÓLIDOS

Los residuos sólidos se definen como:

"Cualquier material generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización, control o tratamiento cuya calidad no permite usarlo nuevamente en el proceso que lo genero". (LGEEPA, 1988.)

1.1.1 Antecedentes históricos

Los residuos han estado presentes desde la misma existencia del hombre, puesto que son inherentes a sus actividades. Así, si consideramos al ser humano desde su estado primitivo, hace aproximadamente 500 000 años a.C. los primeros residuos que generaba se componían principalmente de cáscaras de frutas, semillas, vegetales, pedazos de madera y pedernal con los que confeccionaban sus armas y utensilios, huesos y restos de animales que cazaban y comían. En esa época, la cantidad que se producía era escasa y la composición de estos desechos era de carácter natural sin crear ninguna afectación.

En México, durante la época prehispánica, afirma el padre Francisco Clavijero, bajo el gobierno de Moctezuma Xocoyotzin, no se tiraban residuos sólidos y había más de mil personas que recorrían la ciudad recogiendo los, los servicios urbanos de limpieza y recolección de los residuos sólidos estaban bien organizados; además los habitantes estaban habituados a no tirar nada en las calles.

A partir de la llegada de los españoles fue tradicional en México manejar los residuos sólidos en forma arbitraria, creándose problemas de salud pública, de contaminación ambiental, económicos y disgusto e inconformidad en la sociedad.

En 1787, las calles de México eran intransitables por el desaseo y la falta de limpieza; en casi todas las calles eran basureros ya que los residuos sólidos se arrojaban en la vía pública y no había quien los recogiera.

En consecuencia, el virrey Revillagigedo hizo reglamentaciones municipales para barrer y regar las calles, estableció que los residuos sólidos fueran recogidos por carros tirados por mulas, lo cual evitó que los residuos se acumularan en las calles.

En 1824, las medidas dictadas por Revillagigedo habían dejado de aplicarse, por lo que el coronel Melchor Múzquiz, jefe superior político interino de su provincia, estableció nuevos reglamentos, donde ordena que los carros salgan de mañana y noche, a las horas y rumbos designados y que lleven una campana para avisar al vecindario e implantó multas a quienes no cumplieran las leyes.

En 1884 el servicio de limpia contaba con 83 carros, 43 pipas y 136 mulas, distribuidos entre las ocho inspecciones de policía de la Ciudad de México. De esta manera por primera vez el servicio se descentraliza dado que la ciudad era ya muy grande y los carros no podían recorrerla eficientemente, con la agravante de que el tiradero estaba en uno de los extremos de la ciudad.

En 1936 el servicio de limpia contaba con 2,500 empleados. Dos años antes se había formado el sindicato de limpia y transportes y el equipo con el que contaba se componía de camiones tubulares, carros de volteo de 7 y 20 toneladas. Los carros tirados por mulas cubrían los servicios de la periferia de la ciudad.

En 1940 se inició el reciclaje y la industrialización de los residuos sólidos, a fin de evitar problemas de contaminación de suelo, aire y agua; los tiraderos fueron alojados lo más lejos posible de la ciudad.

A partir de los años cuarenta, el D.F contaba principalmente con dos tiraderos: el de Santa Cruz Meyehualco y el de Santa Fe; el primero en la delegación de Iztapalapa, tuvo una recepción de residuos sólidos de 500 toneladas por día en los primeros años de operación, y 6000 al término de la misma; el segundo, en la delegación de Álvaro Obregón, con una recepción de 2300 ton/día.

A principios de los sesentas se creó la Dirección General de Servicios Urbanos del D.F., de la que dependía la oficina de recolección de residuos sólidos. Al final de esta misma década, desapareció la mencionada dirección general para surgir nuevamente en los ochentas.

De esta dirección depende en la actualidad la recolección, el transporte, el tratamiento y la disposición final de los residuos sólidos de la ciudad de México.

En 1983 se clausura el tiradero de Santa Cruz Meyehualco, pero se crean otros como Santa Catarina, San Lorenzo Tezonco, Tláhuac, Milpa Alta, Tlalpan y Bordo Xochiaca. En 1985 se empiezan a clausurar dichos tiraderos.

En 1984 el Departamento del Distrito Federal (D.D.F), seleccionó dos sitios para la construcción de rellenos sanitarios los cuales son: en terrenos del antiguo lago de Texcoco (Bordo de Xochiaca), y "Prados de la Montaña", cercano al tiradero de Santa Fe.

En 1989, a las autoridades les falta modernizar la práctica de eliminación de los residuos sólidos. (Deffis, 1989).

En 1997 se estima que la recolección de residuos sólidos por habitante en el país 18,389,491(ton/año)(INE, 1997).

1.1.2 Características generales de residuos sólidos

1.1.2.1 Clasificación

Los residuos sólidos se pueden clasificar de diferentes maneras de acuerdo con:

- a) El grado de peligrosidad:
 - Residuos Sólidos peligrosos.
 - Residuos Sólidos no peligrosos.

- b) Su origen (lugar de generación):
 - Industriales
 - Domiciliarios
 - Comerciales
 - De servicios

- c) Sus características químicas:
 - Orgánicos
 - Inorgánicos

- d) Sus características físicas:
 - Plásticos
 - Metales
 - Madera
 - Vidrio
 - Cartón
 - Papel
 - Etc.

Todas las clasificaciones mencionadas son convenientes en la realización de cualquier proyecto ya que permite lograr una mayor visión de la composición de la basura generada en una zona determinada.

1.1.2.2 Composición física

Los componentes que comúnmente forman parte de los residuos sólidos son los siguientes:

- Residuos de alimentos
- Residuos de jardinería
- Metales Ferrosos
- Metales no Ferrosos
- Plásticos
- Piel
- Hule
- Madera
- Vidrio
- Cascajo

- Tela
- Cartón
- Papel
- Tierra
- Latas

El porcentaje de cada componente de los residuos sólidos varía de acuerdo a la localidad, la estación del año, las condiciones económicas de la población generadora y muchos otros factores, en la tabla 1.1, se muestran dichos porcentajes, que se obtuvieron para ciudades de los Estados Unidos.

TABLA 1.1 COMPOSICIÓN FÍSICA DE RESIDUOS SÓLIDOS.

COMPONENTES	PORCENTAJE DEL PESO
Residuos alimenticios	6 - 26
Papel	25 - 45
Cartón	3 - 15
Plástico	2 - 6
Textiles	0 - 4
Hule	0 - 2
Piel	0 - 2
Residuos de Jardinería	0 - 20
Madera	1 - 4
Vidrio	4 - 16
Latas	2 - 8
Metales no ferrosos	0 - 1
Metales ferrosos	1 - 4
Cenizas, polvo, etc.	0 - 10

Fuente: Tchobanoglous G., Theisen H. Y Ellassen R.

1.1.2.3 Características físicas

• **Contenido de humedad (ω)**

En residuos sólidos municipales el contenido de humedad varía entre 15% y 40% según la estación del año y las condiciones climáticas del lugar.

El contenido de humedad de los residuos sólidos se expresa como porcentaje referido, tanto del peso húmedo como del peso seco de los desechos. En la tabla 1.2, se muestra dicho contenido.

Contenido de Humedad =
$$\frac{W_h - W_s}{W_s} \times 100 \tag{1.1.1}$$

En donde:

W_h = Peso húmedo de los desechos

W_s = Peso seco de los desechos.

TABLA 1.2 CONTENIDO DE HUMEDAD DE RESIDUOS SÓLIDOS.

COMPONENTES	HUMEDAD (%)
Residuos de alimentos	50 - 80
Papel	4 - 10
Cartón	4 - 8
Plásticos	1 - 4
Textiles	6 - 15
Hule	1 - 4
Piel	8 - 12
Residuos de Jardinería	30 - 80
Madera	15 - 40
Vidrio	1 - 4
Latas	2 - 4
Metales no ferrosos	2 - 4
Metales ferrosos	2 - 6
Cenizas, polvo, etc.	6 - 12

Fuente: Tchobanoglous G., Theisen H. Y Eliassen R.

• **Densidad (γ)**

Una característica importante de los residuos sólidos municipales es la densidad.

La densidad de los residuos antes de su colocación en el sitio de disposición dependerá de factores como: la ubicación geográfica, la estación del año y el tiempo de almacenaje, así como también, el equipo utilizado en la recolección de los residuos municipales. En la tabla 1.3, se muestra la densidad de los residuos sin compactar.

La densidad in situ depende del espesor de las capas de relleno y de la profundidad a la que se encuentren. En general el valor de la densidad varía entre 150 y 350 kg/m³ en residuos sin compactar, de 350 a 550 kg/m³ en residuos con un grado de compactación bajo y de 800 a 1000 kg/m³ en residuos con un grado de compactación alto. (Tchobanoglous, 1994).

Otras características relacionadas con la densidad son:

- a) Relación de vacíos (e). Cuyo valor varía entre 1 en residuos bien compactados a 15 en residuos no compactados.
- b) Contenido de humedad (ω). En el caso de desechos bien compactados tiene un valor cercano al 40% y en desechos sin compactar entre 10 y 15 %

TABLA 1.3 DENSIDAD DE RESIDUOS SÓLIDOS SIN COMPACTAR.

COMPONENTES	DENSIDAD (kg/m³)
Residuos de alimentos	128.15 - 480.57
Papel	32.04 - 128.15
Cartón	32.04 - 81.10
Plásticos	32.04 - 128.15
Textiles	32.04 - 96.11
Hule	96.11 - 192.23
Piel	96.11 - 256.30
Residuos de Jardinería	64.08 - 224.27
Madera	128.15 - 320.38
Vidrio	160.19 - 480.57
Latas	48.06 - 160.19
Metales no ferrosos	64.08 - 240.29
Metales ferrosos	128.15 - 1121.33
Cenizas, polvo, etc.	320.38 - 961.14

Fuente: Tchobanoglous G., Theisen H. Y Eliassen R.

1.1.2.4 Composición Química

El estudio de la composición química de los residuos es importante en la evaluación de alternativa de procesamiento y en opciones de recuperación. Si se considera que los residuos son una combinación de material semi - humedo y materiales no combustibles, y que éstos pueden ser usados como combustibles, en la tabla 1.4 se muestran los componentes de los residuos sólidos; las características más importantes que es necesario conocer son:

- a) Composición aproximada.
 - Humedad (perdida a 105 °C en una hora)
 - Materia volátil (pérdida adicional sobre ignición a 950 °C).
 - Cenizas (residuos después de quemar)
 - Determinación de Carbono (remanente)
- b) Punto de Fusión de la ceniza.
- c) Análisis final, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre y ceniza, los cuales se muestran en la tabla 1.5.

TABLA 1.4 COMPONENTES DE RESIDUOS SÓLIDOS (ANÁLISIS APROXIMADO).

COMPONENTES	RANGO (%)
Humedad	15 - 40
Materia Volátil	40 - 60
Carbón	5 - 12
Vidrio, Metal, Cenizas	15 - 30

Fuente: Tchobanoglous G., Theisen H. Y Eliassen R.

TABLA 1.5 ANÁLISIS FINAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS (% DE PESO SECO).

COMPONENTES	CARBÓN	HIDRÓGENO	OXÍGENO	NITRÓGENO	AZUFRE	CENIZAS
Residuos de alimentos	48.00	6.40	37.60	2.60	4.00	5.00
Papel	43.50	6.00	44.00	3.00	2.00	6.00
Cartón	44.00	5.90	44.60	3.00	2.00	5.00
Plásticos	60.00	7.20	22.80	-	-	10.00
Textiles	55.00	6.60	31.20	4.60	1.50	2.50
Hule	78.00	10.00	-	20.00	-	10.00
Piel	60.00	8.00	11.60	10.00	4.00	10.00
Residuos de Jardinería	47.80	6.00	38.00	30.40	3.00	4.50
Madera	49.50	6.00	42.70	2.00	1.00	1.50
Cenizas, polvo, etc.	26.30	3.00	20.00	5.00	2.00	68.00

Fuente: Tchobanoglous G., Theisen H. Y Ellassen R.

d) Valor Calorífico.

El valor calorífico aproximado (en Btu/lb) puede determinarse mediante la fórmula de Dulong Modificada; en la tabla 1.6 se muestran el contenido de energía de los residuos sólidos:

$$\text{Btu/lb} = 145.5 C + 620 \left(H - \frac{1}{8} O \right) + 41S$$

(1.1.2)

donde:

C= porcentaje de carbón
H= porcentaje de hidrógeno
O= porcentaje de oxígeno
S= porcentaje de azufre

TABLA 1.6 CONTENIDO DE ENERGÍA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS.

COMPONENTES	RESIDUO INERTE (%)*	ENERGÍA (BTU/LB)
Residuos de alimentos	2 - 8	1,500 - 3,000
Papel	4 - 8	5,00 - 8,000
Cartón	3 - 6	6,000 - 7,500
Plásticos	6 - 20	12,000 - 16,000
Textiles	2 - 4	6,500 - 8,000
Hule	8 - 20	9,000 - 12,000
Piel	8 - 20	6,500 - 8,500
Residuos de Jardinería	2 - 6	1,000 - 8,000
Madera	0,6 - 2	7,500 - 8,500
Vidrio	96 - 99	50 - 100
Latas	96 - 99	-
Metales no ferrosos	90 - 99	100 - 500
Metales ferrosos	94 - 99	1,000 - 5,000
Cenizas, polvo, etc.	60 - 80	1,000 - 5,000
Residuo Municipales	-	4,000 - 5,000

Fuente: Tchobanoglous G., Thelsen H. Y Ellassen R. * Después de una combustión completa.

1.2 EL CICLO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES

Cuando se hace referencia a los residuos sólidos municipales, se les asigna una cierta trayectoria con un principio y un fin bien definido, esta trayectoria puede convertirse en un ciclo cerrado. Constituyendo lo que puede denominarse como el "ciclo de los residuos sólidos". La figura 1.1, muestra de manera esquemática la disposición de este ciclo; destacan las etapas básicas que lo pueden conformar. Las tendencias en México son hacia la desincorporación en la prestación del servicio de limpia vía diferentes mecanismos y esquemas de organización. Cabe señalar que no siempre se presentan todas las etapas en un sistema de manejo de residuos sólidos para una localidad en particular; a continuación se describirá cada una de estas etapas.

1.2.1 Generación

Constituye la primera etapa del ciclo de los residuos sólidos, y consiste en la acción de generar una determinada cantidad de residuos en un tiempo determinado, y que por lo general se deriva del uso o consumo de algún bien o servicio. La fuente de generación puede ser de índole diversa: domiciliaria, comercial, hospitalaria, etc.

1.2.2 Almacenamiento

El almacenamiento de los residuos sólidos consiste en su retención temporal de éstos en la fuente generadora, por lo general en recipientes cuyas características pueden variar significativamente de una fuente a otra. Los

residuos son almacenados durante un intervalo de tiempo determinado por la frecuencia del servicio de recolección.

1.2.3 Pretratamiento

En algunos casos, los residuos sólidos son sujetos a algún tipo de transformación simple en la propia fuente generadora, lo que constituye un pretratamiento. Esta transformación puede involucrar, desde una simple separación de subproductos, hasta un cambio en las propiedades (generalmente físicas) de los residuos sólidos.

1.2.4 Recolección

La recolección consiste en tomar los residuos sólidos en la fuente que los ha generado y depositarlos en los vehículos recolectores, para su posterior traslado a una estación de transferencia, instalación de tratamiento o disposición final.

1.2.5 Transporte Primario

Consiste en trasladar los residuos sólidos directamente de la fuente generadora, a algún sitio de transferencia, tratamiento o disposición final.

1.2.6 Transporte Secundario

Consiste en el traslado de los residuos sólidos de una estación de transferencia o planta de tratamiento (en este caso, el rechazo que resulta del tratamiento), a un sitio de disposición final.

1.2.7 Separación Simultánea

Es el proceso mediante el cual se lleva a cabo una separación manual de subproductos, de manera simultánea con las etapas de recolección, transporte primario y disposición final. En México, esta actividad es comúnmente conocida como "pepena".

1.2.8 Transferencia

Es la acción de transferir los residuos sólidos de las unidades vehiculares de recolección a las de transferencia, con el propósito de transportar una mayor cantidad de residuos, y logra disminuir los costos de transporte, incrementando la cobertura del servicio de recolección con el mismo número de vehículos, y disminuyendo el deterioro de los mismos por los largos recorridos a los sitios de disposición final, los cuales por lo general se encuentran en malas condiciones.

1.2.9 Tratamiento

Es el conjunto de procesos al cual se someten los residuos sólidos para modificar sus propiedades físicas, químicas o biológicas, para su reciclaje, obtención de energía, eliminar su peligrosidad, etc.

1.2.10 Disposición Final

Es el depósito permanente de los residuos sólidos en sitios determinados, los cuales deben cumplir ciertos requisitos para evitar la afectación del ambiente y la salud humana.

1.3 MÉTODOS DE DISPOSICIÓN

La disposición de los residuos y el manejo son labores técnicas, que mantienen gran interdependencia con la ecología, los recursos naturales, la energía, la economía, la política, la legislación y la administración; estos rubros le dan un carácter multidisciplinario, por lo que son necesarias la colaboración y la coordinación intersectorial de técnicos y especialistas en esos campos.

Actualmente existen diversos métodos de disposición de residuos sólidos, de los cuales sólo algunos de ellos pueden adaptarse a las necesidades y características de los centros de población; en cada caso particular es necesario llevar a cabo estudios, entre otros, de generación de residuos sólidos, superficie de terreno disponible, condiciones climatológicas de la región y condiciones económicas.

Las técnicas de tratamiento más difundidas en el mundo son:

1.3.1 Relleno Sanitario

Es un método empleado para la disposición final de los residuos sólidos, el cual consiste en colocar, esparcir y compactar los residuos sobre el suelo, en un área previamente determinada llamada celda. Uno de los requisitos principales es que, al finalizar la jornada de trabajo, los residuos depositados diariamente queden cubiertos por una capa de tierra; las dimensiones de las celdas se definen de acuerdo con la cantidad de residuos recolectados por día.

Existen tres métodos definidos de relleno sanitario, su diferencia radica en el proceso constructivo que se sigue en la disposición de los desechos sólidos:

- a) Método de Trinchera.
- b) Método de Área.
- c) Método Combinado.

La aplicación y la operación de cualquiera de estas tres técnicas de disposición dependerán, entre otros factores de: la topografía, la dirección y velocidad de

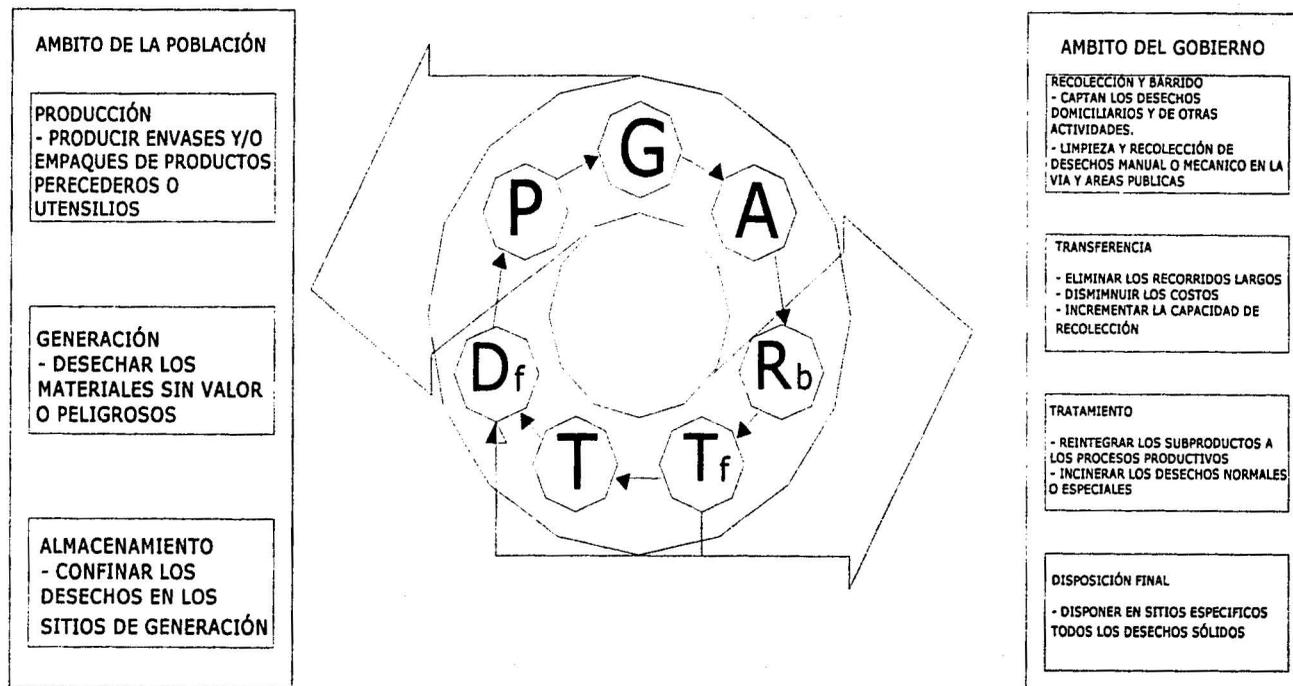


Fig. 1.1 Ciclo de residuos sólidos municipales.

los vientos y, la cantidad y las características de los residuos sólidos, esté tema se ampliará más en el capítulo II.

1.3.2 Incineración

La incineración se define como un proceso de reducción de peso y volumen de los residuos sólidos, mediante la combustión controlada en presencia de oxígeno. Las reducciones que se logran en este proceso varían del 75 % al 90% en peso, dependiendo de la composición de los residuos. El residuo es comúnmente depositado en un relleno cercano después de recuperar cualquier material útil. El bióxido de carbono y demás gases generados en el proceso de combustión son liberados a la atmósfera.

El concepto teórico de la incineración, establece una reacción química entre el combustible y el comburente, en donde los residuos sólidos funcionan como combustible, libera energía térmica (calor de combustión) a medida que es quemada.

Los principales productos del proceso de incineración son partículas en suspensiones y gases como Dióxido de carbono (CO_2), Dióxido de azufre (SO_2), Nitrógeno (N_2), Oxígeno (O_2), proveniente del aire en exceso, que no es posible quemar completamente, así como de gases inherentes debido a los residuos sólidos y al aire utilizado como fuente de oxígeno. También se genera agua, cenizas y escorias conteniendo metales, vidrios, piedras y materiales inertes.

Cuando la combustión es incompleta se puede presentar una cantidad importante de monóxido de carbono. Si la combustión se realiza a temperaturas elevadas puede haber disociación del nitrógeno, originándose los óxidos de nitrógeno (NO_x), aunque cabe aclarar que estos compuestos, pueden generarse más por cambios en la temperatura del proceso y por el nitrógeno presente en el aire, que por el contenido de este elemento en los residuos sólidos.

Es importante mencionar que los residuos sólidos contienen azufre y que los compuestos azufrados (SO_x) debido a la combustión de los residuos sólidos, normalmente se precipitan junto con las escorias y las cenizas.

Por otro lado, dentro de la emisión a la atmósfera, también puede haber presencia de ácido clorhídrico (HCl), así como metales pesados, furanos y dioxinas; siempre y cuando los residuos incluyan en su composición, materiales formadores de tales compuestos.

1.3.3 Generación de composta o composteo

Se entiende por composteo la descomposición biológica y estabilización de sustratos orgánicos bajo condiciones que permiten el desarrollo de temperaturas termofílicas como resultado del calor producido biológicamente,

con un producto final suficientemente estable para el depósito y aplicación en la tierra sin efectos ambientales adversos.

En el tratamiento de residuos sólidos el proceso de composteo tiene los siguientes objetivos:

- a) Reducción de masa y volumen.
- b) Eliminación de lugares en donde se reproduzcan insectos y plagas.
- c) Utilización de recursos desaprovechados.

1.4 CONTAMINANTES COMUNES

En la actualidad la contaminación se puede clasificar de acuerdo a sus características, a su origen y a las fuentes de generación.

La contaminación puede clasificarse de acuerdo a sus características biológicas, físicas y químicas para conocer la manera como afecta la salud y el medio ambiente.

- a) *Contaminación biológica*. Este tipo de contaminación se presenta cuando existen microorganismos que causan un desequilibrio en la naturaleza, por ejemplo: bacterias, hongos, virus, protozoarios, etc.
- b) *Contaminación física*. Es causada por factores físico - mecánicos relacionados principalmente con la energía. Por ejemplo: altas temperaturas, ruido, ondas electromagnéticas, etc.
- c) *Contaminación química*. Es aquella provocada por materia, especialmente por sustancias químicas, que pueden ser orgánicas e inorgánicas.

La contaminación también se puede clasificar de acuerdo con su origen y puede ser:

- a) *Natural o endógena*. Es aquella causada por fuentes de contaminación de origen natural, como son: volcanes, efectos geoclimáticos, etc. Su característica principal es que generalmente se encuentra dispersa en un área mayor, por lo que el efecto es diluido por los procesos naturales.
- b) *Antropogénica o exógena*. Es aquella que es producida o distribuida por el ser humano, por ejemplo: los residuos sólidos, el smog; descargas de aire, agua y suelo procedentes de procesos industriales, etc. Este tipo de contaminación ocurre en áreas cercanas a zonas urbanas y regiones industriales, donde los contaminantes están concentrados en pequeños volúmenes de aire, agua y suelo.

1.4.1 Características de los contaminantes

Existen varias características importantes que se deben conocer sobre la manera en que los contaminantes afectan el ambiente, así como para tratar estos efectos.

- a) *Potencial de hidrógeno(pH)*. Se considera como una de las propiedades más importantes de los contaminantes, ya que determina si la sustancia es corrosiva; de ser así, se le puede considerar como residuos peligrosos. Para que una sustancia se pueda considerar corrosiva, debe tener un $2.0 \leq \text{pH} \leq 12.5$.
- b) *Volatilidad*. Es la propiedad que poseen algunos compuestos de poder evaporarse a bajas temperaturas y afectar la atmósfera. Entre los principales compuestos volátiles se encuentran las sustancias orgánicas como el etileno, propileno, benceno y la acetona, que se evaporan y contribuyen directamente a la contaminación del aire, o a través de reacciones químicas o fotoquímicas para producir compuestos secundarios.
- c) *Degradabilidad*. Es la característica que tienen los compuestos que son reducidos por agentes naturales físicos, químicos y procesos biológicos a un estado neutral o a niveles aceptados por la naturaleza.
- d) *Difusión*. Es la capacidad que poseen los contaminantes de poder distribuirse en el medio que los rodea. Por ejemplo los gases tienen la propiedad de mezclar las moléculas, sin necesidad de que exista una reacción química.
- e) *Tiempo de vida media*. Es el tiempo que puede durar el contaminante en el medio ambiente antes de ser degradado por los procesos naturales. Esta propiedad es diferente para cada tipo de compuesto; algunos tienen un tiempo de vida menor a un día, mientras que otras sustancias nunca son degradadas por los procesos naturales.

Como fuente generadora de contaminación, debemos entender el origen físico o geográfico donde se produce una emisión contaminante al ambiente, ya sea al aire, al agua o al suelo.

Las fuentes que generan contaminación de origen antropogénico más importantes son las siguientes:

- **Industriales**. Una de las fuentes más importantes de contaminación es la industrial, la cual, dependiendo del tipo de proceso industrial, podrá emitir ciertos contaminantes, ya sea en forma de residuos sólidos, emisiones al aire y a la hidrosfera.

Entre los contaminantes atmosféricos más importantes que genera a la industria, se encuentran los óxidos de azufre, los óxidos de nitrógeno y las partículas suspendidas. Otros contaminantes que se generan en los procesos industriales son el bióxido y el monóxido de carbono, los cuales son producidos por la combustión total o parcial de los energéticos utilizados en estos procesos.

Los principales contaminantes del agua generados por las industrias son compuestos químicos, en los que incluyen compuestos orgánicos e inorgánicos disueltos o dispersos. Entre las sustancias inorgánicas están las sales metálicas solubles como cloruro, sulfatos, nitratos, fosfatos y carbonatos; los desechos ácidos, alcalinos y gases tóxicos disueltos, como el bióxido de azufre, el amoníaco, el ácido sulfhídrico y el cloro. Los contaminantes orgánicos son compuestos que contienen carbono, por ejemplo, los solventes, aceites, breas, colorantes y compuestos de tipo sintético, éstos tienden a agotar el oxígeno disuelto del agua.

- Comerciales. Las actividades comerciales son fuentes de contaminación importante, principalmente de residuos sólidos, los cuales se derivan de gran cantidad de envolturas y empaques que utilizan los productos que comercializan.
- Agrícolas. Los contaminantes más importantes dentro de las actividades agrícolas son de origen químico, y se pueden clasificar como fertilizantes y pesticidas, entre los cuales se tienen a los herbicidas, insecticidas y fungicidas.
- Domésticos. Los principales contaminantes generados domésticos en México son los residuos sólidos, en los que se incluyen los residuos alimenticios (44.14 %), el papel (18.91%), el cartón (4.91%), el pañal desechable (5.04%), el residuo de jardinería (4.32%) el vidrio transparente (3.97%), la fibra vegetal (3.28 %), residuo fino o pulverizado (12.43%) y el plástico (3.09%). En los tiraderos a "cielo abierto" se producen una gran cantidad de microorganismo patógenos que afectan la salud humana, así como lixiviados, derivados de la biodegradación. (Enkerlin, 1997).

Dentro de los contaminantes más importantes podemos encontrar el biogas que es contaminante generado por la descomposición de los residuos sólidos confinados y es la mezcla de gases producto de la degradación biológica, en condiciones anaeróbicas, de componentes orgánicos. Generalmente, consta de 50% metano y poco menos de 50 % dióxido de carbono; en un relleno sanitario se considera como biogas la mezcla de gases que se generan en el seno del mismo. El mayor o menor porcentaje de cualquiera de los componentes será función del tiempo y de la degradación que los residuos sufran bajo las condiciones de temperatura, presión, densidad, humedad, etc., prevalcientes en cada punto del confinamiento (Calvo, 1995).

El biogas es incoloro, inodoro e insípido y su densidad es menor a la del aire. Los principales componentes del biogas son: el metano (CH₄), el bióxido de carbono (CO₂), el hidrógeno (H₂) y el nitrógeno (N₂) aunque constituyentes como argón, sulfuro de hidrógeno, azufre, sulfuros, disulfuros, propano, isobutano, n-butano, isopentano, hexano, heptano, octano, nonano, tolueno y benceno pueden formar parte de la mezcla(ibídem).

La variedad de contaminantes esta determinada por la diversidad de productos que diariamente se consumen en todas las actividades desarrolladas o industrializadas por el hombre. Así los contaminantes del suelo van desde la basura doméstica, hasta los residuos tóxicos industriales.

1.5 LIXIVIADOS

Como consecuencia de la descomposición de los residuos sólidos se producen líquidos percolados o lixiviados y gases, que al abandonar el relleno pasan a los alrededores y los afecta de manera nociva.

La interrelación entre el contenido de humedad, tamaño de los residuos sólidos, circulación de aire y temperatura es relativamente compleja. El efecto total de estos factores es lo que determina la evaporación y, por tanto, la producción de lixiviados de rellenos. En la tabla 1.7 se muestra la composición típica de los lixiviados.

TABLA 1.7 COMPOSICIÓN DE LOS LIXIVIADOS.

PARÁMETRO	INTERVALO REPRESENTATIVO DE CONCENTRACIÓN (mg/l)
Potasio (K)	200 a 999
Sodio (Na)	199 a 1200
Calcio (Ca)	100 a 3000
Magnesio (Mg)	100 a 1501
Cloruro (Cl)	300 a 3000
Alcalinidad	500 a 1000
Fierro Total (Fe)	1 a 1000
Manganeso (Mn)	0.01 a 100
Cobre (Cu)	Menos de 10
Níquel (Ni)	0.01 a 1.01
Zinc (Zn)	0.01 a 100.1
Plomo (Pb)	Menos de 5
Mercurio (Hg)	Menos de 0.2
Nitrógeno amoniacal (NH)	10 a 999
Fósforo (P) como fosfato	1 a 100.1
Nitrógeno orgánico	10 a 1000
Carbono orgánico disuelto total	300 a 30000
Demanda química de oxígeno (DQO)	900 a 90000
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	20000 a 35000
Sólidos totales disueltos	4000 a 40000
Potencial de Hidrógeno (pH)	3.5 a 8.5

Fuente: Trejo Vázquez Rodolfo

Los contaminantes más importantes en los lixiviados son Demanda bioquímica de oxígeno (DBO), Demanda química de oxígeno (DQO), cloruros y nitratos.

Los contaminantes bacteriológicos se pueden filtrar después de varios metros de viaje a través del suelo; no así los cloruros, nitratos y sólidos suspendidos que después de una larga pluma pueden contaminar un acuífero. Con respecto al movimiento de la pluma de lixiviados, diversos estudios concuerdan en que la distancia recorrida por los contaminantes dependen de la composición y permeabilidad del suelo, así como del tipo de contaminante. Los contaminantes orgánicos biodegradables no viajan mucho, al contrario de los orgánicos resistentes e inorgánicos. En algunos casos, la velocidad es tan baja que durante años el impacto no se nota.

De acuerdo con estudios que se llevaron a cabo en el Reino Unido se determinó que la movilidad de los metales pesados decrece en la proporción siguiente:

$$\text{Ni} > \text{Hg} = \text{Cd} > \text{Zn} > \text{Cr} > \text{Pb} = \text{Cu} \quad (1.1.3)$$

Los mecanismos de atenuación de los metales pesados más importantes son la precipitación, la absorción y el intercambio iónico. En el cloruro se observó que los mecanismos de atenuación son la dilución y la dispersión. La velocidad de su movimiento es casi igual a la del frente del líquido, por esta razón la concentración de lixiviado se estima por la concentración de cloruros.

Se observó que la atenuación en el potasio es baja y los componentes orgánicos del lixiviado muestran un comportamiento cíclico. Sus picos máximos son cercanos a la concentración inicial y muestran decrementos debido al aumento de actividad microbiana.

En general, los componentes orgánicos son menos solubles que los inorgánicos. La presentación de elementos inorgánicos disueltos en el lixiviado se puede elevar debido a la disolución de sustancias relativamente insolubles del suelo y otras formaciones geológicas con ayuda de actividad microbiana. (Trejo, 1999).

1.5.1 Tipos de lixiviados

Las características de los lixiviados cambian con el tiempo. Los lixiviados pueden clasificarse por su edad o tiempo de residencia en el relleno como jóvenes o viejos. Conforme el relleno se hace más viejo, hay un cambio de un periodo aerobio relativamente corto a un periodo más largo de descomposición anaerobia, el cual tiene dos subfases distintas: fase ácida, seguida de una metanogénica.

Los lixiviados de la fase ácida, lixiviados "jóvenes" se caracterizan por presentar altos valores de contaminantes orgánicos, generalmente las concentraciones de DQO son mayores a 5000 mg/l, y una concentración baja de nitrógeno menor a los 400 mg N/L. Una gran porción de la materia orgánica

consiste principalmente de ácidos grasos volátiles, producto intermedio de la degradación anaerobia que toma lugar en el relleno. Estos ácidos orgánicos de bajo peso molecular ($PM < 120$) constituyen la mayoría de la materia orgánica de los lixiviados con valores alcanzados hasta el 95 % del COT (carbono orgánico total) de los lixiviados. La relación de DBO_5/DQO para estos lixiviados es usualmente de 0.4 - 0.5 o más alta. La concentración de ácidos grasos volátiles también resulta en valores de pH de 4. Este ambiente ácido promueve el incremento en las concentraciones de metales pesados en los lixiviados. Para este tipo de lixiviados biológicos (aerobios y anaerobios), son eficientes para reducir el alto contenido orgánico fácilmente degradable. (Romero, 2000)

En la fase metanogénica del periodo de descomposición anaerobia, las bacterias formadoras de metano degradan los ácidos grasos volátiles y reduce la carga orgánica de los lixiviados. El carbón orgánico que permanece después de esta degradación se debe principalmente a las sustancias con alto peso molecular. Estas sustancias son menos susceptibles a una degradación microbiana (biológica) y tienden a permanecer en los lixiviados. En esta etapa, el lixiviado se encuentra químicamente estabilizado y es denominado "lixiviado viejo". Durante esta segunda fase, la DBO disminuye más rápidamente que el DQO (los lixiviados contienen una baja fracción orgánica biodegradable), así que la relación DBO_5/DQO disminuye generalmente a un valor de 0.1. la disminución en la concentración de los ácidos orgánicos volátiles causan un aumento en el valor del pH de 7 o más (ibídem).

Debido a que los lixiviados son considerados altamente contaminantes, en los que es posible encontrar compuestos persistentes y recalcitrantes como: plaguicidas, hidrocarburos clorados y metales pesados, entre otros; es de vital importancia su tratamiento, ya que pueden convertirse en una fuente de contaminación muy alta, logrando migrar al suelo y fuentes hidrológicas.

1.6 AFECTACIÓN AMBIENTAL AL MEDIO

El impacto ambiental al suelo puede ser muy variado, ya que depende de los contaminantes que afecten a este.

Las características más importantes que deben considerarse de los residuos contaminantes del suelo son:

- Toxicidad. Esta en función de la concentración en el ambiente de una sustancia determinada.
- Degradabilidad. Ocurre cuando la sustancia desechada se integra al medio en que se encuentre, de tal forma que deja de constituir un contaminante.

- **Movilidad.** Depende de las características físicas y de la naturaleza química del contaminante, así como de la interacción que tenga con el suelo.

Así, los contaminantes pueden permanecer en las capas superiores del suelo, o bien, solubilizar y transportarse como sólido suspendido a través de la zona vadosa del suelo (insaturada en agua) hasta difundirse en los cuerpos de aguas subterráneas (manto freático).

La afectación del contaminante se puede analizar desde el punto de la edafología, la cual se clasifica en dos grupos: la endógena y la exógena, según de donde provengan los contaminantes ya sea del mismo sistema edáfico o bien provengan del exterior.

En donde el mayor efecto que puede ocasionar la contaminación de suelos por lixiviados es el de contaminar las aguas subterráneas y a su vez tiene repercusiones en la salud humana al consumo de ésta o en contacto con los suelos contaminados, en el ámbito edafológico daña los nutrientes y minerales de este, a su vez dañando la vida que depende de él, evitando el crecimiento de organismos vivos, este tema se ampliara más en el capítulo III.

1.7 CONTAMINACIÓN DEL SUELO POR LIXIVIADOS

La contaminación del suelo ha recibido menos atención que la contaminación del aire y del agua. Una forma de clasificar la contaminación del suelo es la siguiente:

1. Por aplicación directa de químicos tales como pesticidas y fertilizantes.
2. Por disposición de residuos antropogénicos.
3. Por derrames accidentales.
4. Por deposición de contaminantes atmosféricos.

El daño causado a los suelos depende, tanto de la cantidad, como de la naturaleza física y química del contaminante.

Los sitios donde normalmente se contaminan los suelos, o se tiene alta probabilidad de contaminarlos, son:

- a) Industrias.
- b) Centros poblacionales.
- c) Sitios de almacenamiento (tanques de almacenamiento de combustible, aceites, solventes, pesticidas, lubricantes).
- d) Vehículos de transporte de químicos.
- e) **Sitios de disposición final de residuos municipales e industriales.**

Los contaminantes del suelo, pueden sufrir transformaciones químicas y desplazarse en dirección horizontal y vertical. Debido a que hay varios tipos de

suelos, el comportamiento de un contaminante determinado depende de la composición y características físicas (como la porosidad) de los mismos.

La contaminación de suelos es un fenómeno de mayor duración y con grandes consecuencias para el aire y el agua; sin embargo, un suelo contaminado es, en general, el producto de procesos graduales, largos en el tiempo.

El conjunto de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo lo hace un sistema clave, especialmente importante en los ciclos biogeoquímicos superficiales, en los que actúan como un reactor complejo, capaz de realizar funciones de filtración, descomposición, neutralización, inactivación, almacenamiento, etc. Por todo ello el suelo actúa como barrera protectora de otros medios más sensibles, como los hidrológicos y los biológicos. La mayoría de los suelos presentan una elevada capacidad de depuración.

Esta capacidad de depuración tiene un límite diferente para cada situación y suelo. Cuando se alcanza ese límite el suelo deja de ser eficaz e incluso puede funcionar como una "fuente" de sustancias peligrosas para los organismos que viven en él o de otros medios relacionados.

En los estudios de contaminación, no basta con detectar la presencia de contaminantes sino que se han de definir los máximos niveles admisibles y además se han de analizar posibles factores que pueden influir en la respuesta del suelo a los agentes contaminantes, como son: vulnerabilidad y carga crítica, que pueden modificar los denominados "umbrales generales de la toxicidad" para la estimación de los impactos potenciales y la planificación de las actividades permitidas y prohibidas en cada tipo de medio.

Vulnerabilidad. Representa el grado de sensibilidad (debilidad) del suelo frente a la agresión de los agentes contaminantes. Este concepto está relacionado con la capacidad de amortiguación. A mayor capacidad de amortiguación, menor vulnerabilidad. El grado de vulnerabilidad de un suelo frente a la contaminación depende de la intensidad de afectación, del tiempo que debe transcurrir para los efectos indeseables se manifiestan en las propiedades físicas y químicas de un suelo y de la velocidad con que se producen los cambios secuenciales en las propiedades de los suelos en respuesta al impacto de los contaminantes.

El grado de contaminación de un suelo no puede ser estimado exclusivamente a partir de los valores totales de los contaminantes frente a determinados valores guía, sino que se hace necesario considerar la biodisponibilidad, movilidad y persistencia.

Por **biodisponibilidad** se entiende la asimilación del contaminante por los organismos, y en consecuencia la posibilidad de causar efecto, negativo o positivo.

La **movilidad** regulará la distribución del contaminante y por tanto su posible transporte a otros sistemas.

La persistencia regulará el periodo de actividad de la sustancia y por tanto es otra medida de su peligrosidad.

Carga crítica. Representa la cantidad máxima de un determinado componente que puede ser aportado a un suelo sin que se produzcan efectos nocivos.

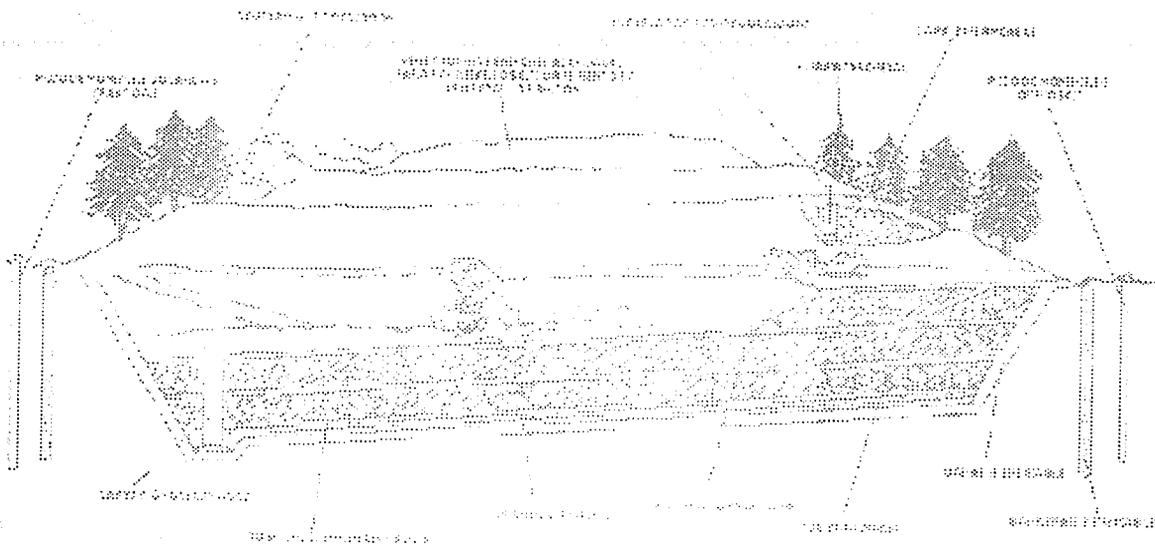
La contaminación del suelo por lixiviados se debe a filtración de los sitios de disposición final (rellenos sanitarios) en donde aun con todos los procesos que tienen para el control de estos, se filtran por el suelo por debajo del relleno ocasionando que se contaminen las aguas subterráneas. En el proceso de filtración a través de los estratos de suelo, se separan parte de los constituyentes químicos y biológicos contenidos en el lixiviado, debido a la acción absorbente de los materiales que conforman cada estrato.

Como principal objetivo se encuentra evitar que los lixiviados se filtren hasta los cuerpos de agua subterráneos mediante la eliminación y/o contención. Actualmente se emplean diversos métodos, los cuales incluyen materiales aislantes para limitar el movimiento de los fluidos y los gases producto de las diferentes reacciones físicas, químicas y biológicas.

Como segundo objetivo se encuentra la recolección de los lixiviados y de los gases. Se deberá diseñar un sistema adecuado que permita recolectar, conducir y almacenar los fluidos, estos sistemas deberán incluir canales, tuberías, y depósitos con la capacidad suficiente para el manejo.

La disposición final de los lixiviados concluye el proceso con el cual se minimiza el riesgo de contaminación de los mantos freáticos. Existen varias alternativas que pueden ser seleccionadas de acuerdo con los recursos disponibles. Entre las diferentes opciones de disposición final se encuentran:

- a) Reciclaje del lixiviado.
- b) Evaporación del lixiviado.
- c) Tratamiento seguido por evacuación.
- d) Descarga a los sistemas municipales de recolección de aguas residuales.



CAPÍTULO II

ASPECTOS BÁSICOS DE LOS RELLENOS SANITARIOS

La disposición final de los residuos sólidos esta relacionada con la preservación del ambiente, así como de la salud pública, por lo que se debe tratar y controlar mediante un sistema adecuado que minimice los impactos negativos hacia el entorno ecológico. Dentro de las alternativas viables para la disposición final de los residuos sólidos municipales, se cuenta con el método de relleno sanitario. En este capítulo se exponen los aspectos básicos de estas obras, para lo cual se presenta en forma inicial las definiciones básicas requeridas en el estudio.

2.1 DEFINICIONES

Las siguientes definiciones son las establecidas en la NOM-083-ECOL-1996 y en el proyecto de norma NOM-084-ECOL-1994.

Acuífero. Es cualquier formación geológica por la que circulan o se almacenan aguas subterráneas, que puedan ser extraídas para su explotación, uso o aprovechamiento.

Acuífero confinado. Es aquel acuífero que está limitado en su parte superior por una unidad de baja conductividad hidráulica y el nivel piezométrico presenta una presión superior a la atmosférica.

Acuífero libre. Es un acuífero en el cual el nivel freático o nivel de saturación se encuentra a la presión atmosférica.

Acuífero semiconfinado. Aquel acuífero que tiene una unidad saturada de baja conductividad hidráulica en su parte superior o inferior, que contribuye con un pequeño caudal (goteo) debido a los gradientes inducidos por bombeo del acuífero.

Acuitardo. Es cualquier formación geológica por la que circula muy lentamente agua subterránea, por lo que generalmente no son utilizados para su explotación uso o aprovechamiento.

Agua subterránea. Es el agua que se encuentra en el subsuelo, en formaciones geológicas parcial o totalmente saturadas.

Áreas naturales protegidas. Las zonas del territorio nacional y aquellas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción, en que los ambientes originales no han sido significativamente alterados por la actividad del hombre, y que han quedado sujetas al régimen de protección.

Biogas. La mezcla de gases, producto de la descomposición biológica de la fracción orgánica de los residuos sólidos.

Capacidad de intercambio catiónico. Es el total de cationes intercambiables que puede absorber un suelo, expresado en miliequivalentes de los cationes por cada 100 g (cien gramos) de masa de suelo seco.

Carga hidráulica. Es la energía presente en un acuífero, normalmente tiene dos componentes: **a)** la carga relacionada con la elevación con respecto a un punto de referencia que es normalmente el nivel medio del mar, y **b)** la carga de presión o presión de poro.

Celda. El bloque unitario de construcción de un relleno sanitario.

Celda diaria. Las áreas definidas donde se esparcen y compactan los residuos sólidos durante el día, siendo cubiertos al final del mismo, con una capa de algún material que en caso de ser suelo, también se compacta.

Conductividad hidráulica. Es la propiedad de un medio geológico de permitir el flujo de agua subterránea en un acuífero o acuitardo, considerando las condiciones de densidad y viscosidad del agua.

Contaminantes no reactivos. Son los contaminantes que viajan en solución, a la misma velocidad lineal que el agua subterránea. No sufren reacciones químicas ni biológicas con el medio granular.

Cubierta diaria. La capa de material natural o sintético con que se cubre los residuos depositados durante el día de operación.

Cubierta intermedia. El estrato de material natural o sintético con que se cubre una franja o capa de residuos en un relleno sanitario

Cubierta final. El revestimiento de material natural o sintético que confina el total de las capas de que consta un relleno sanitario.

Descripción estatigráfica. Es la descripción de los estratos del subsuelo en cuanto a sus propiedades físicas, químicas e hidráulicas, de acuerdo al código de nomenclatura estatigráfica vigente.

Discontinuidades. Superficie marcada por modificaciones radicales de las propiedades físicas de las rocas. Estas discontinuidades pueden ser por ejemplo, fallas o fracturas.

Disposición. La descarga, depósito, inyección, vertido, derrame o colocación de cualquier tipo de residuo en o sobre el suelo o cualquier suelo de agua.

Disposición final. La acción de depositar permanentemente los residuos en sitios y condiciones adecuados para evitar daños al ambiente.

Falla. Es cuando se producen desplazamientos relativos de una parte de roca con respecto a la otra, como resultado de los esfuerzos que se generan en la corteza terrestre

Falla activa. Son aquellas fallas que han sufrido desplazamiento durante el holoceno (último millón de años).

Fracción de carbono orgánico. La fracción de carbono orgánico se refiere al porcentaje de carbono orgánico en el suelo, derivado de restos de plantas. Es importante en la retención de contaminantes orgánicos.

Fractura. Es una discontinuidad en las rocas producida por un sistema de esfuerzos.

Freatofitas. Son plantas que extienden sus raíces por debajo del nivel freático y extraen sus requerimientos de humedad directamente de la zona saturada.

Generación. La cantidad de residuos sólidos originados por el componente unitario de una determinada fuente en un intervalo de tiempo.

Geofísica. La ciencia que estudia las propiedades físicas de la tierra y el conocimiento de la estructura geológica de los materiales que la constituyen.

Geología. Es el estudio de la formación, evolución, distribución, correlación y comparación de los materiales terrestres.

Hidrogeología. Son el conjunto de actividades tales como perforaciones, determinación de la recarga, profundidades a nivel estático, interacción química agua-roca y propiedades hidráulicas que permiten conocer y localizar los sistemas de aguas subterráneas, su dirección y velocidad de movimiento.

Hidrología. La ciencia que estudia los componentes primarios del ciclo hidrológico y su relación entre sí. Considera la interacción y dinámica de la atmósfera con cuerpos de agua superficial tales como ríos, arroyos, lagunas, lagos, etc.

Infiltración. Introducción suave de un líquido entre los poros de un sólido referido al agua, el paso lento de ésta a través de los intersticios del suelo y del subsuelo.

Lixiviado. Líquido proveniente de los residuos, el cual se forma por reacción arrastre o percolación y que contiene disueltos o en suspensión, componentes que se encuentran en los mismos residuos.

Material de cubierta. El material de origen natural o sintético, utilizado para cubrir los residuos sólidos con el propósito de controlar el ingreso de diversos organismos, así como controlar la humedad de los estratos de residuos, el movimiento de gas producido por la degradación de la materia orgánica, el inicio y propagación de incendios, la dispersión de residuos y también proporcionar al sitio una apariencia adecuada.

Nivel freático. La superficie de agua que se encuentra en el subsuelo bajo el efecto de la fuerza de gravitación y que delimita la zona de aireación de la saturación.

Nivel piezométrico. Es el valor de la carga hidráulica observado de un acuífero o acuitardo a diferente profundidad en el mismo y en el medio saturado.

Parámetros hidráulicos. Son la conductividad hidráulica, la porosidad, la carga hidráulica, los gradientes hidráulicos de una unidad hidrológica, así como coeficiente de almacenamiento.

Percolación. Es el movimiento descendente de agua a través del perfil del suelo debido a la influencia de la gravedad.

Permeabilidad. La propiedad que tiene una sección unitaria de terreno para permitir el paso de un fluido a través de ella sin deformar su estructura bajo la carga producida por un gradiente hidráulico.

Peso volumétrico. El peso de los residuos sólidos contenidos en una unidad de volumen.

Porosidad efectiva. Es la relación del volumen de vacíos o poros interconectados de una roca o suelo dividido por el volumen total de la muestra.

Potencial de contaminación. Es la interacción entre el tipo, intensidad, disposición y duración de la carga contaminante con la vulnerabilidad del acuífero; está definida por las condiciones de flujo del agua subterránea y las características físicas y químicas del acuífero.

Relleno Sanitario. Es un método de ingeniería para la disposición final de los residuos sólidos en el suelo, de tal manera que proteja el ambiente, mediante el extendido de los residuos en capas delgadas, compactándolas al menor volumen posible y cubriéndolas con tierra al término de cada día de trabajo.

Residuos sólido municipal. El residuo sólido que proviene de actividades que se desarrollan en casa - habitación, sitios y servicios públicos demoliciones, construcciones, establecimientos comerciales y de servicios, así como residuos industriales que no se deriven de su proceso.

Sistema activo de extracción. El control del movimiento del biogas mediante una presión negativa inducida (vacío).

Sistema de flujo. Es definido por la dirección de flujo que sigue el agua subterránea, considerando las zonas de recarga y descarga, las cargas y gradientes hidráulicos o profundidad y el efecto de fronteras hidráulicas, Incluye además la interacción con el agua superficial y comprende sistemas locales, intermedios y regionales.

Sistema pasivo de extracción. El sistema utilizado para controlar el movimiento del biogas a presión natural y mediante el mecanismo de convección.

Talud. Es la inclinación formada por la acumulación de fragmentos del suelo con un ángulo de reposo del material de terreno de que se trate.

Unidades litológicas. Conjunto de materiales geológicos compuestos predominantemente de cierta asociación de minerales que tienen un origen común.

Volumen de extracción. Se refiere a la cantidad de agua subterránea que se extrae de un acuífero a través de pozos norias.

Zona de aireación. La zona que contiene agua bajo presión menor a la de la atmósfera, está delimitada entre la superficie del terreno y el nivel freático.

Zona de descarga. Es la porción del drenaje subterráneo de la cuenca en la cual el flujo de agua subterránea fluye de mayor profundidad hacia el nivel freático; es decir. El flujo subterráneo es ascendente.

Zona de impacto sísmico. En el área que tiene una probabilidad mayor o igual al 10% de que la aceleración horizontal en una roca dura exceda el 10 % de la aceleración de la gravedad (g) en 250 años.

Zona de inundación. Área sujeta a variaciones de nivel de agua por arriba del nivel del terreno, asociadas con la precipitación pluvial, el escurrimiento y las descargas de agua subterráneas.

Zona de recarga. Es la porción del drenaje subterráneo de la cuenca en la cual el flujo del agua subterránea fluye del nivel freático hacia mayor profundidad, es decir, el flujo subterráneo es descendente.

Zona de saturación. El área que se caracteriza por tener sus poros o fracturas llenas de agua, su límite superior corresponde al nivel freático y su límite inferior es una unidad impermeable.

Zona no saturada. Es el espesor que existe entre la superficie del terreno y el nivel freático. Es equivalente a la profundidad del nivel freático.

Por otro lado la Sociedad Americana de Ingeniería Civil define como relleno sanitario:

" Relleno sanitario es una técnica para la disposición de la basura en el suelo sin causar perjuicio al medio ambiente y sin causar molestias o peligro a la salud y la seguridad pública; esté método utiliza principios de ingeniería para confinar la basura en la menor área posible, reduciendo su volumen al mínimo practicable y cubriendo la basura así depositada con una capa de tierra con la frecuencia necesaria o por lo menos al final de cada jornada".

En la figura 2.1 se presenta un esquema general de la construcción típica de un relleno sanitario.

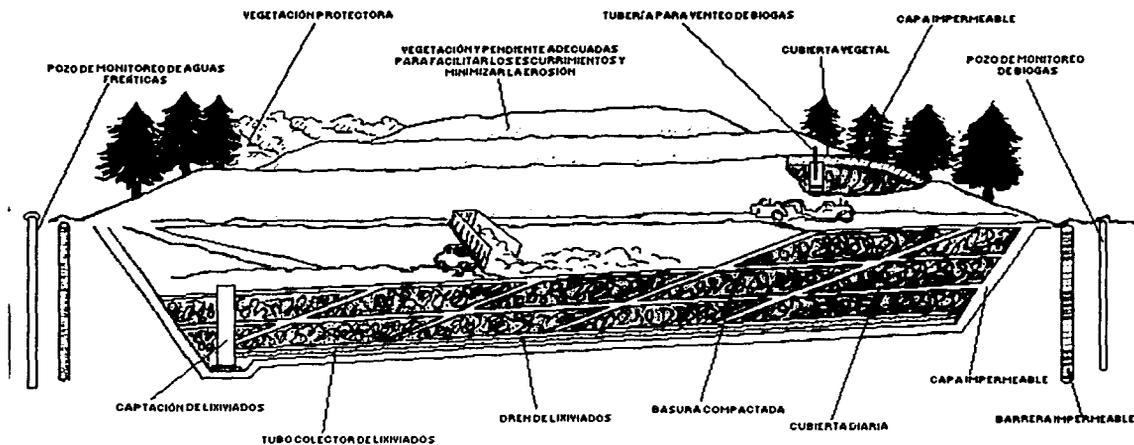


Fig. 2.1 Esquema de un relleno sanitario.

2.2 **NORMATIVIDAD ACTUAL.**

Dentro de la normatividad que se tiene que tomar en cuenta en México para determinar las condiciones de los sitios destinados a rellenos sanitarios, al igual que para el diseño y la construcción del mismo, existen hasta la fecha las siguientes normas de las cuales en seguida se presenta un resumen de ellas:

2.2.1 Norma Oficial Mexicana NOM-083-ECOL-1996, que establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a la disposición final de los residuos sólidos municipales. (Publicada en el D.O.F. de fecha 25 de noviembre de 1996).

Los sitios de disposición final de residuos sólidos municipales generan lixiviados que contienen diversos contaminantes que pueden afectar los recursos naturales, en especial los acuíferos y los cuerpos superficiales de agua. La aplicación de esta Norma permitirá proteger el ambiente, preservar el equilibrio ecológico y minimizar los efectos contaminantes.

Esta Norma Oficial Mexicana establece las condiciones de ubicación, hidrológicas, geológicas e hidrogeológicas que deben reunir los sitios destinados a la disposición final de los residuos sólidos municipales, y es de observancia obligatoria para aquellos que tienen la responsabilidad de la disposición final de los residuos sólidos municipales.

2.2.1.1 Especificaciones

Con el fin de cumplir con las diferentes especificaciones de ubicación, que debe satisfacer un sitio para la disposición final de residuos sólidos municipales, y facilitar la toma de decisiones en las diferentes etapas de los estudios que se describen en el siguiente punto de esta Norma Oficial Mexicana, debe ser considerado el diagrama de flujo que se describe de ésta norma que se presenta en la figura 2.2

Las condiciones mínimas que debe cumplir un sitio de disposición final de residuos sólidos municipales, son las siguientes:

2.2.1.1.1 Aspectos generales

- Restricción por afectación a obras civiles o áreas naturales protegidas.
- Las distancias mínimas a aeropuertos son:
 - a) De 3000 m (tres mil metros) cuando maniobren aviones de motor a turbina.
 - b) De 1500 m (mil quinientos metros) cuando maniobren aviones de motor a pistón.
- Respetar el derecho de vía de autopistas, ferrocarriles, caminos principales y caminos secundarios.
- No se deben ubicar sitios dentro de áreas naturales protegidas.
- Se deben respetar los derechos de vía de obras públicas federales, tales como oleoductos, gasoductos, poliductos, torres de energía eléctrica, acueductos, etc.
- Debe estar alejado a una distancia mínima de 1500 m (mil quinientos metros), a partir del límite de la zona urbana de la población por servir, así como de poblaciones rurales de hasta 2500 habitantes. En caso de no cumplirse con esta restricción, se debe demostrar que no existirá afectación alguna a dichos centros de población.
- La localización de sitios de disposición final de residuos sólidos municipales, para aquellas localidades con una población de hasta 50,000 habitantes, o cuya recepción sea de 30 toneladas por día, de estos residuos; se deben hacer considerando exclusivamente las especificaciones establecidas en los puntos siguientes de esta Norma Oficial Mexicana.

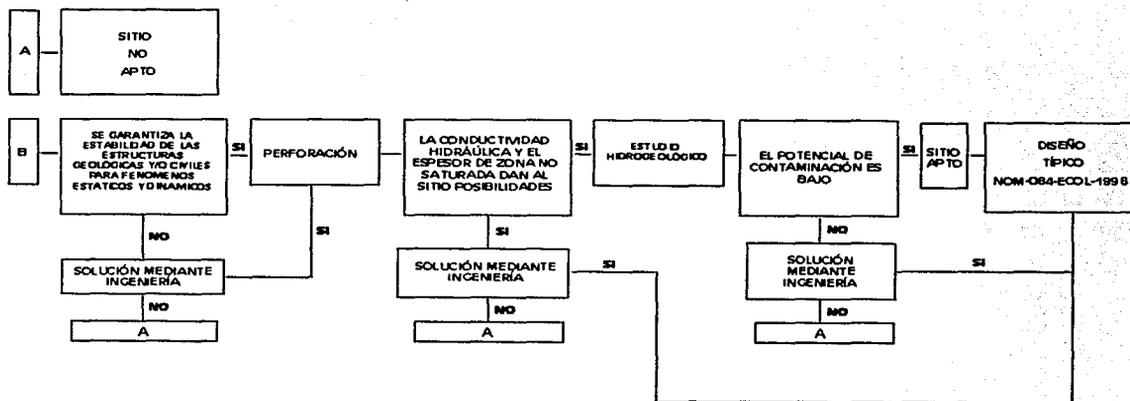
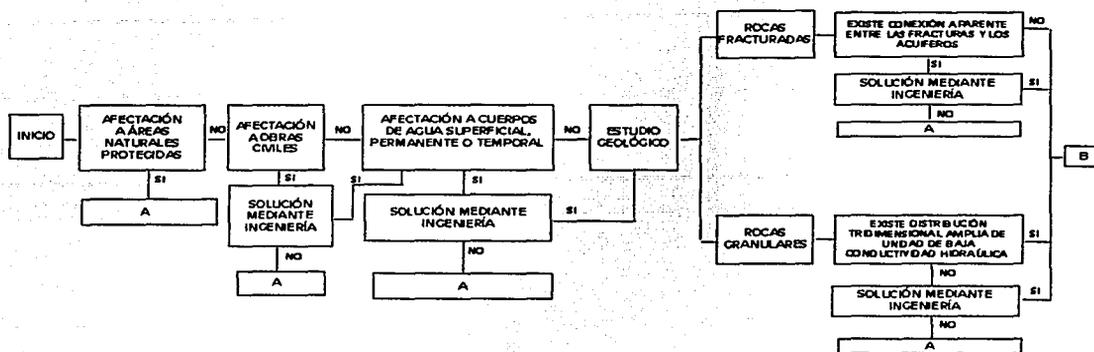


Fig. 2.2 Diagrama de flujo establecido en la NOM-083 ECOL-1996.

2.2.1.1.2 Aspectos hidrológicos

- Se debe localizar fuera de zonas de inundación con periodos de retorno de 100 años. En caso de no cumplir lo anterior, se debe demostrar que no exista la obstrucción del flujo en el área de inundación o posibilidad de deslaves o erosión que provoquen arrastre de los residuos sólidos.
- El sitio de disposición final de residuos sólidos municipales no se debe ubicar en zonas de pantanos, marismas y similares.
- La distancia de ubicación del sitio con respecto a cuerpos de agua superficiales con caudal continuo, debe ser de 1000 m (mil metros) como mínimo y contar con una zona de amortiguamiento tal que pueda retener el caudal de la precipitación pluvial máxima presentada en los últimos 10 años en la cuenca, definida por los canales perimetrales de la zona.

2.2.1.1.3 Aspectos geológicos

- Debe estar a una distancia mínima de 60 m (sesenta metros) de una falla activa que incluya desplazamiento en un periodo de tiempo de un millón de años.
- Se debe localizar fuera de zonas donde los taludes sean inestables, es decir, que puedan producir movimientos de suelo o roca, por procesos estáticos y dinámicos.
- Se deben evitar zonas donde existan o se puedan generar asentamientos diferenciales que lleven a fallas o fracturas del terreno, que incrementen el riesgo de contaminación al acuífero.

2.2.1.1.4 Aspectos hidrogeológicos

- En caso de que el sitio para la disposición final de los residuos sólidos municipales esté sobre materiales fracturados, se debe garantizar que no exista conexión con los acuíferos de forma natural y que el factor de tránsito de la infiltración (f) sea $\leq 3 \times 10^{-10} \text{Seg}^{-1}$.
- En caso de que el sitio para la disposición final de los residuos sólidos municipales esté sobre materiales granulares, se debe garantizar que el factor de tránsito de la infiltración (f) sea $\leq 3 \times 10^{-10} \text{seg}^{-1}$.
- La distancia mínima del sitio a pozos para extracción de agua para uso doméstico, industrial, riego y ganadero tanto en operación como abandonados, debe estar a una distancia de la proyección horizontal por lo menos de 100 m (cien metros) de la mayor circunferencia del cono de abatimiento, siempre que la distancia resultante sea menor a 500m (quinientos metros), esta última será la distancia a respetar.

2.2.1.2 Procedimientos

La selección de un sitio para la disposición final de residuos sólidos municipales requiere de estudios geológicos, hidrogeológicos y otros complementarios.

2.2.1.2.1 Estudios geológicos

Se deben realizar estudios geológicos de tipo regional y local, de acuerdo con las siguientes características:

- *Estudio geológico regional.* Determinar el marco geológico regional con el fin de obtener su descripción estatigráfica, así como su geometría y distribución, considerando también la identificación de discontinuidades, tales como fallas y fracturas. Asimismo, se debe incluir todo tipo de información existente que ayude a un mejor conocimiento de las condiciones del sitio; esta información puede ser de corte litológicos de pozos de agua, exploración geotécnica, petrolera o de otra índole.
- *Estudio geológico local.* Determinar las unidades litológicas en el sitio, su geometría, distribución y presencia de fallas y fracturas. Asimismo, debe incluir estudios geofísicos para complementar la información sobre las unidades litológicas. El tipo de método a utilizar y el volumen de trabajo, debe garantizar el conocimiento tridimensional del comportamiento y distribución de los materiales en el subsuelo hasta una profundidad y distribución horizontal adecuada a las características geológicas e hidrogeológicas del área en que se ubica el sitio.
- Si los resultados geológicos y geofísicos preliminares muestran que no existe conexión aparente entre las rocas fracturadas con acuíferos o que la distribución de unidades litológicas de baja permeabilidad es amplia, se debe realizar un mínimo de una perforación e la periferia del sitio.

2.2.1.2.2 Estudios hidrogeológicos

Los estudios hidrogeológicos deben considerar cinco etapas.

1. Evidencia y uso del agua subterránea.

Definir la ubicación y distribución de todas las evidencias del agua subterránea, tales como manantiales, pozos y norias, a escala regional y local. Asimismo, se debe determinar el volumen de extracción, tendencias de la explotación y planes de desarrollo en la zona de estudio.

2. Identificación del tipo de acuífero.

Identificar las unidades hidrogeológicas, extensión y geometría, tipo de acuífero (libre, confinado, semiconfinado) y relación entre las diferentes unidades hidrogeológicas que definen el sistema acuífero.

3. Determinación de parámetros hidráulicos de las unidades hidrogeológicas, características físico-químicas del agua subterránea y características elementales de los estratos del subsuelo.

Determinar la profundidad al nivel piezométrico en el sistema acuífero, dirección y velocidad del agua subterránea a partir de los parámetros de conductividad hidráulica, carga hidráulica y porosidad efectiva.

Conocer la composición química del agua subterránea.

Determinar la conductividad hidráulica (K), la fracción de carbono orgánico (FCO) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) de los diferentes estratos del subsuelo de la zona no saturada.

4. Análisis del sistema de flujo.

Con base en la información geológica y de los puntos 1, 2 y 3 de esta Norma Oficial Mexicana y de otros elementos hidrogeológicos, tales como zonas de freatofitas, zonas de recarga y descarga, etc. se debe definir el sistema de flujo local y regional del área de estudio.

5. Evaluación del potencial de contaminación.

Se debe integrar toda la información obtenida de los puntos 1, 2, 3 y 4 de esta Norma Oficial Mexicana, para determinar si el sitio es apto o si requiere obras de ingeniería. Para ello se debe considerar la gráfica que se muestra en la figura 2.3.

Esta gráfica define la condición de tránsito de la infiltración aceptable que deben tener los sitios destinados a la disposición final de los residuos sólidos municipales, su valor de frontera está definido por $f \leq 3 \times 10^{-10} \text{seg}^{-1}$ que representa el factor de tránsito de la infiltración, el cual relaciona a la velocidad promedio final de infiltración contra los diferentes espesores de los materiales de la zona no-saturada incluyendo la porosidad de ellos, según la siguiente fórmula:

$$f = \frac{K * i}{U * d}$$

Donde:

(2.2.1)

f = factor de tránsito de la infiltración, (seg-1).

d = espesor de la zona no-saturada, (m).

U = porosidad promedio efectiva de los materiales de la zona no-saturada, (adimensional)

i = gradiente hidráulico, (adimensional).

K = conductividad hidráulica promedio de los materiales de la zona no-saturada, (m/s).

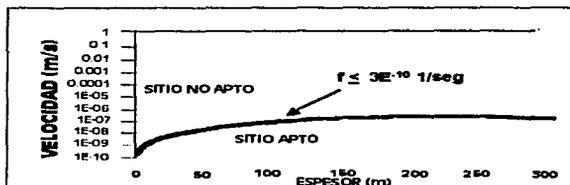
La velocidad promedio (v) se calcula a partir de la conductividad hidráulica saturada (K) de los materiales del subsuelo en la zona no-saturada, dividida

por la porosidad promedio efectiva (U), considerando un gradiente hidráulico unitario (i), de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$V = \frac{K * i}{U} \quad (2.2.2)$$

El valor de (f) obtenido, para el caso de que se trate, debe graficarse para determinar su aptitud y viabilidad. Los sitios aptos son aquellos cuyo factor de tránsito de la infiltración es:

$$f \leq 3 \times 10^{-10} \text{ seg}^{-1} \quad (2.2.3)$$



$$f = (K * i) / (U * d)$$

Donde:

- f = factor de tránsito de la infiltración, (1/a)
- d = espesor de la zona no-saturada, (m).
- U = porosidad promedio efectiva, (adimensional).
- i = gradiente hidráulico, (adimensional)
- K = conductividad hidráulica, (m/a)

Fig. 2.3 Gráfica de la evaluación potencial de la contaminación para determinar si un sitio es apto

2.2.2 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

La presente norma oficial mexicana tiene como objeto establecer los requisitos para el diseño de un relleno sanitario y la construcción de sus obras complementarias.

2.2.2.1 Diseño de un relleno sanitario

El diseño de un relleno sanitario, para la disposición final de los residuos sólidos municipales deberá sujetarse al siguiente procedimiento:

2.2.2.1.1 Topografía

Información referente a la forma superficial y del perímetro (límites) del sitio, que deberá cumplir con las siguientes especificaciones:

Planimetría.

1. Tolerancia angular = $1' (N)^{1/2}$

2. Tolerancia lineal = $\frac{1}{3000}$

3. Ubicación de los límites del predio, cursos o cuerpo de agua superficial, áreas de inundación, caminos en servicio, líneas de conducción existentes en el sitio (luz, agua, drenaje, gas, teléfono, etc.) así como todo tipo de estructuras y construcciones existentes dentro del predio.

Donde:

N = Número de vértices de la poligonal.

Altimetría.

Una vez establecido un banco de nivel fijo y de fácil localización, se deberá efectuar una nivelación a lo largo de las poligonales abierta y cerrada con puntos de niveles, a cada 20 m. Como máximo y especificar la altura de los sistemas de conducción, que atraviesen el sitio, incluyendo sus sistemas de sujeción.

Secciones.

Se deberá ubicar secciones a partir de la estación 0+000 del camino de acceso, debiendo referenciarse a las estaciones establecidas sobre el perfil del camino, las secciones serán perpendiculares al eje del camino de acceso y abarcarán 20 m. A cada lado de dicho eje. Para la poligonal cerrada, se establecerá un eje central que divida al predio en dos áreas aproximadamente iguales, debiendo definirse ejes paralelos a cada 50 m., mismos que deben seccionarse transversalmente a cada 25 m. Aproximadamente para superficies de 8 hectáreas o menos y a cada 50 m. En terrenos mayores a 8 hectáreas.

Configuración topográfica.

Las curvas de nivel se trazarán de acuerdo a los siguientes requerimientos:

- A cada medio metro para sitios planos y ligeramente ondulados.
- A cada metro para ondulados, hondonadas profundas y valles escarpados.

2.2.2.1.2 Cantidades y características de los residuos sólidos

Se deberá recabar información referente a las cantidades y características de los residuos sólidos, tanto actuales como proyectadas para un periodo mínimo igual a diez años o bien igual al período de vida útil del sitio.

2.2.2.1.3 Selección del método

La selección del método a utilizar para la operación del relleno sanitario, se deberá realizar con base a las condiciones topográficas, geomorfológicas y geohidrológicas del terreno elegido, seleccionando de entre los siguientes: trinchera, área y combinado.

2.2.2.1.4 Requerimientos volumétricos

Los requerimientos volumétricos para el diseño del Relleno Sanitario, deberán obtenerse para los años estimados, mediante los volúmenes totales anuales y acumulados tanto de los residuos sólidos municipales como del material de cubierta, empleando para ello la proyección de generación de residuos y los pesos volumétricos establecidos en la tabla 2.1.

TABLA 2.1. RESIDUOS SOLIDOS MUNICIPALES.

TAMAÑO DEL ASENTAMIENTO HUMANO	PARA DISEÑO DE LA CELDA DIARIA PESO VOLUMÉTRICO TON/M ³	PARA EL CÁLCULO DE VIDA ÚTIL PESO VOLUMÉTRICO TON/M ³
Hasta 500,000 hab.	0.500	0.750
Mayores de 500,000 hab.	0.600	0.900

2.2.2.1.5 Cálculo de la capacidad volumétrica

El cálculo de la capacidad volumétrica del sitio, deberá realizarse considerando la configuración topográfica que presente el predio donde se alojará el relleno sanitario, así como sus niveles de desplante. Se deberá reportar por cada curva de nivel la capacidad volumétrica parcial y acumulada.

2.2.2.1.6 Cálculo de la vida del sitio

El cálculo de la vida útil del sitio deberá obtenerse por medio de la capacidad volumétrica total del sitio, la cantidad de residuos a disponer y el volumen de material de cubierta requerido, conforme a la siguiente ecuación:

$$U = \frac{V}{365 * Gt} \tag{2.2.4}$$

Donde:

U= Vida útil del relleno sanitario, expresado en años.
 V= Volumen del sitio seleccionado, (m³).

G_t = Volumen ocupado por la cantidad total diaria de residuos sólidos a disponer más la cantidad de material de cubierta demandado para cubrir esos residuos, $m^3/día$.

2.2.2.1.7 Dimensiones de la celda diaria

Altura de celda: la altura máxima deberá ser de 3.00 m. Incluyendo el espesor de los residuos a disponer y el material de cubierta requerido.

Ancho de celda: el ancho de la celda (frente de trabajo) deberá estar determinado por la longitud necesaria para el funcionamiento adecuado y ejecución de maniobras del equipo, tanto de compactación como de transporte.

Para poblaciones de hasta 250,000 hab. El frente de trabajo se define conforme a la ecuación siguiente:

$$F = 0.0333 * NTX \quad (2.2.5)$$

Donde:

- F = Longitud del frente de trabajo, (m).
- N = Número de vehículos recolectores en la primera hora pico.
- T = Tiempo promedio de descarga de cada vehículo recolector, (min.).
- X = ancho de los vehículos recolectores, (m).

Para las poblaciones mayores de 250,000 hab. El ancho mínimo del frente de trabajo debe calcularse conforme a la ecuación siguiente:

$$F = \sum_{i=1}^n (X_i)^2 \quad (2.2.6)$$

Donde:

- F = Longitud del frente de trabajo, (m).
- X_i = Ancho de la hoja topadora de cada una de las maquinas que se utilizarán simultáneamente, (m).
- i = Número de equipos.

El largo de la celda deberá calcularse en función de la altura y el ancho previamente determinados, con la siguiente ecuación:

$$L = \frac{V}{W * A} \quad (2.2.7)$$

Donde:

- L = Largo de la celda, (m).
- V = Volumen de la celda, (m^3).
- W = Ancho de la celda, (m).

A = Altura de la celda, (m).

Con base al **método de área** las celdas se construirán inicialmente en un extremo del sitio y se avanza hasta terminar con el otro extremo, cuando existan ondulaciones y depresiones en el terreno deberán ser utilizadas como respaldo conforme a las primeras celdas de una determinada capa constructiva.

2.2.2.1.7.1 Criterio constructivo

- I. Se prepara el terreno para trabajarlo basado en terrazas y al mismo tiempo extraer material para cubierta.
- II. El frente de trabajo o ancho de la celda se calculará de acuerdo a los puntos anteriores.
- III. Los cortes al terreno se harán, siguiendo la topografía del sitio para formar terrazas y aprovechar al máximo el terreno.
- IV. El talud de la celda diaria tendrá una relación de 1:3 ángulo 18°.
- V. Cada celda del relleno será contigua con la del día anterior y así sucesivamente hasta formar una hilera de celdas que se denominarán franjas.
- VI. Las franjas al irse juntando forman capas, estas se construirán considerando la altura del sitio disponible para el relleno y al ubicarse en el plano de construcción, se calendarizan y se numeran de abajo hacia arriba usando 3 subíndices, uno indicando capa, el segundo indicará la franja y una tercera para la celda diaria.
- VII. Las cubiertas intermedias que sirven de separación de las celdas diarias serán de 30 cm. El espesor de la cubierta debe ser de 60 cm.
- VIII. La compactación de los residuos dependerá de su composición, del grado de humedad y del equipo utilizado. Para obtener entre un 50 a 70 por ciento de reducción de su volumen.
- IX. Las cubiertas tendrán una pendiente del 2 % para el drenado adecuado que impidan el paso del agua, para evitar la erosión se deberán revegetar con especies propias de la región.

Con base al **método de trinchera** las celdas se construirán sobre la base del talud de la trinchera donde los residuos son compactados en capas inclinadas, posteriormente será cubierta con el material excavado de la futura trinchera.

2.2.2.1.7.2 Criterio constructivo

- I. La profundidad mínima de la trinchera será de 2.00 m de los cuales 1.50 m será de residuos y el resto de material de cubierta.
- II. La trinchera deberá contar con una pendiente del 2% que permita el drenado de la excavación a lo largo de toda su longitud.
- III. El ancho de la trinchera será como mínimo de 9.00 m. Para facilitar la descarga de los residuos sólidos y la operación de la excavación de la máquina.
- IV. El proceso es el mismo del método de áreas a partir de este punto.

2.2.2.1.8 Obras complementarias

El relleno sanitario deberá comprender obras complementarias correspondientes a la densidad de población expresada en la tabla 2.2.

2.2.2.1.9 Áreas de acceso y espera

Las áreas de acceso y espera tienen como propósito el control de entradas y salidas del personal y los vehículos de recolección.

El acceso al relleno sanitario debe tener un ancho de 8.00 m como mínimo.

Antes del acceso al frente de trabajo se deberá tener un área de espera con la capacidad suficiente para el estacionamiento de los vehículos recolectores y de transferencia en la hora pico. En la tabla 2.2 se muestra el rango de la población que puede manejar un relleno sanitario y las instalaciones necesarias para éste.

TABLA 2.2 RANGO DE POBLACIÓN.

INSTALACIÓN DE:	NÚMERO DE HABITANTES.			
	HASTA 50,000	50,001 A 200,000	200,000 A 500,000	500,000 EN ADELANTE
Área de acceso y espera		*	*	*
Cerca o área perimetral		*	*	*
Caseta de vigilancia	*	*	*	*
Caseta de pesaje y básculas		*	*	*
Caminos permanentes	*	*	*	*
Áreas de emergencia de disposición final		*	*	*
Drenajes perimetrales e interiores	*	*	*	*
Instalación de energía eléctrica			*	*
Pozos de monitoreo para lixiviados		*	*	*
Señalamientos fijos y móviles	*	*	*	*
Sistema de captación de biogas	*	*	*	*
Área de amortiguamiento			*	*
Almacén y cobertizo		*	*	*
Área administrativa		*	*	*
Servicios sanitarios			*	*
Sistema de monitoreo de biogas			*	*
Sistema de captación y tratamiento de lixiviados		*	*	*

2.2.2.1.10 Cerca perimetral

El relleno sanitario deberá estar cercado, como mínimo con alambre de púas de cinco hilos de 1.50 m de alto, a partir del nivel del suelo con postes de concreto o tubos galvanizados, debidamente empotrados y colocados a cada 3 m entre sí, para poblaciones de hasta 500,000 habitantes, y como mínimo con maya ciclónica de 2.20m de alto para poblaciones mayores.

2.2.2.1.11 Caseta de vigilancia

Las dimensiones de la caseta de vigilancia tendrá como mínimo 4.00 m² y deberán instalarse a la entrada del relleno sanitario.

2.2.2.1.12 Caseta de pesaje y báscula

Las dimensiones de la caseta tendrán como mínimo 16 m² para alojar el dispositivo indicador de la báscula y el mobiliario necesario para el registro y archivo de datos.

La báscula deberá ubicarse cerca de la entrada del relleno sanitario y contar con:

Superficie de dimensiones suficientes para dar servicio a la unidad recolectora o de transferencia de mayor volumen de carga.

Capacidad acorde a la unidad recolectora de mayor volumen de carga.

La báscula deberá ser de una precisión de 5 Kg y su instalación deberá apegarse a las especificaciones del fabricante.

2.2.2.1.13 Caminos

Los caminos serán de dos tipos exteriores e interiores.

Los caminos exteriores deben cumplir como mínimo las especificaciones siguientes:

Ser de trazo permanente, y garantizar el tránsito por ellos en cualquier época del año, a todo tipo de vehículos que acudan al relleno sanitario.

Cuando por volumen de tránsito y de la capacidad de carga de los vehículos, se haga necesario la colocación de la carpeta asfáltica, esta superficie de rodamiento deberá estar sobre el nivel de despalme, misma que definirá la subrasante, en este caso, para recibir la carpeta se deberá construir: Una sub-base con espesor mínimo de 12 cm formada de material natural producto de la excavación o explotación de banco de materiales, y una base de espesor de 12 cm de grava controlada y arena compactada al 90 % de la prueba proctor. El espesor de la carpeta asfáltica, cuya finalidad es proporcionar una superficie

estable, uniforme, impermeable y de textura apropiada, se calculará en función del valor relativo de soporte del suelo, de la carga de diseño y del volumen de tránsito.

Los caminos internos deben cumplir las especificaciones siguientes:

Deberán permitirse la doble circulación de los vehículos recolectores, hasta el frente de trabajo del relleno sanitario; deberán ser del tipo temporal y que no presenten pendientes mayores del 5 %.

Los caminos interiores y exteriores deberán ser diseñados y construidos conforme a los criterios básicos establecidos en la tabla 2.3.

2.2.2.1.14 Area de emergencia

El área de emergencia será destinada para la recepción de los residuos municipales, cuando por situaciones climatológicas no permita la operación en el frente de trabajo, para facilitar la operación del relleno, además se deberá contar con lonas plásticas, residuos provenientes de demolición, o del barrido de calles para cubrir los residuos.

El área de emergencia deberá:

Estar ubicada en el área que presente las mejores condiciones para su operación. Que su capacidad sea suficiente para la operación ininterrumpida de 6 meses. Que exista material adecuado y en condiciones suficientes para cubrir diariamente los residuos.

TABLA 2.3 CRITERIOS BÁSICOS PARA CAMINOS.

CARACTERÍSTICAS	CAMINOS EXTERNOS			CAMINOS INTERNOS	
	CLASE DE CAMINOS				
	PLANO Y ONDULADO	MONTAÑOSO	MUY ACCIDENTADO	PLANO Y ONDULADO	ACCIDENTADO
Velocidad de diseño (km/h)	60	40	30	40	25
Grado máximo	11,00´	24,30´	44,00´	23,00´	57,00´
Radio mínimo (m)	105	47	26	50	20
Ancho de corona (m)	6	6	6	4	4
Pendiente máxima (%)	8	9	10	5	5
Carga para diseño	HS-20	HS-20	HS-20	HS-10	HS-10
Carga superficial de rodamiento	Revestido	Revestido	Revestido	Transitable en cualquier época del año.	Transitable en cualquier época del año.

2.2.2.1.15 Drenaje

Las obras de drenaje serán de tipo permanente y temporal.

Las obras de drenaje permanente se construirán en los límites del relleno que tienen como objeto la captación del escurrimiento de aguas arriba, los canales deberán revestirse con mortero: cemento - arena en proporción de 1:3 o mediante un sampeado de piedra junteada con mortero cemento - arena en proporción 1:5, la velocidad del agua dentro de los canales no debe ser menor de 0.60 m/seg. ni mayor de 2.00 m/seg.

Las obras de drenaje temporal deberán construirse mediante canales de sección triangular con taludes de 3:1, rellenos de grava de 3cm de tamaño máximo para evitar socavones, y captar las aguas pluviales para conducir fuera del área de trabajo.

Para los drenajes permanentes y temporales, el dimensionamiento de canales, se deberá efectuar mediante la fórmula de Manning, obteniendo el gasto de diseño a partir del método racional americano o la fórmula de Burklieziegler.

Fórmula del método racional americano.

$$Q = \frac{CiA}{0.36} \quad (2.2.8)$$

Donde:

- Q = Gasto máximo (l/seg.).
- C = Coeficiente de escurrimiento.
- i = Intensidad de lluvia máxima horaria promedio (mm/h).
- A = Área por drenar (ha).
- 0.36 = Factor de conversión

Fórmula de Burklieziegler.

$$Q = 27.78 CiS^{1/4} A^{3/4} \quad (2.2.9)$$

Donde:

- Q = Gasto máximo (l/seg.).
- C = Coeficiente de escurrimiento.
- i = Intensidad de lluvia máxima horaria promedio (mm/h).
- S = Pendiente del terreno (milésimas)
- A = Área por drenar (ha).
- 27.78 = Factor de conversión

Estas obras de drenaje, deberán diseñarse con capacidad para manejar caudales iguales o mayores al de una tormenta con periodo de retorno de 25 años.

2.2.2.1.16 Instalación de energía eléctrica

Las instalaciones de energía eléctrica deberán satisfacer las necesidades de iluminación y energía en señalamientos exteriores e interiores, requerimientos en oficinas, e instalación de alumbrado en los frentes de trabajo.

2.2.2.1.17 Señalamiento

Los señalamientos se dividirán en tres géneros: informativos, preventivos y restrictivos, pudiendo ser de tipo móvil o fijo y deberán ajustarse a lo establecido en el "Manual de Dispositivos para el Control de Tránsito en Calles y Carreteras."

2.2.2.1.18 Sistema de impermeabilización

El sistema de impermeabilización será utilizado para aquellos rellenos sanitarios donde el nivel de aguas freáticas se localice a menos de 10 m de profundidad.

El sistema de impermeabilización deberá diseñarse para toda la base del relleno y podrá ser origen natural como sintético, o bien alguna combinación de estos, debiendo asegurar una permeabilidad mínima de 1×10^{-5} cm/seg. Se deberán demostrar que los materiales que integran dicho sistema no se deteriorarán ni perderán sus propiedades y ser resistente a los esfuerzos físicos que resulten del peso de los materiales y residuos que serán colocados sobre este sistema de impermeabilización.

Los materiales de origen natural pueden ser importados o bien del mismo sitio y en ambos casos se deberán especificar el manejo o trato que deberá dárseles para reducir su permeabilidad a los límites establecidos o en su defecto se deberá demostrar que su espesor es capaz de absorber o atenuar la carga contaminante de los lixiviados, evitando su migración hacia los acuíferos.

2.2.2.1.19 Sistema de captación y extracción de lixiviados

Deberá instalarse un sistema de captación de lixiviados inmediatamente por encima del sistema de impermeabilización.

Los sistemas de captación de lixiviados deberán ser capas drenantes, ubicadas principalmente en la base del relleno y sobre cualquier capa superior donde se espere tener acumulación de líquidos y estar diseñadas para conducir de la forma más rápida posible el agua libre del relleno hasta cárcamos de colección. Estas capas drenantes podrán constituirse en forma de redes de drenes (tuberías perforadas) o trincheras. Su pendiente mínima debe ser de 0.4 %y su conductividad hidráulica de 1×10^{-5} m/seg. para espesores de 0.30 m o bien una transmisibilidad de 3×10^{-6} m²/seg para espesores menores.

2.2.2.1.20 Pozos de monitoreo para lixiviados

Los sistemas de monitoreo para lixiviados deberán contar de por lo menos 3 pozos de muestreo que se sitúen uno en la dirección del flujo de las aguas subterráneas a 500 m antes de llegar al sitio del relleno sanitario, otro a 500 m aguas abajo del sitio y el último en el sitio del relleno. Los pozos que se ubican fuera del relleno sanitario deberán profundizar 2.00 m dentro del acuífero y el nivel o base del relleno. La construcción de los pozos de monitoreo para lixiviados deberán realizarse únicamente con materiales y técnicas que aseguren la contaminación del acuífero, y podrán ser de un diámetro mínimo que permita la introducción y recuperación del sistema muestreador debiendo ser este último resistente a la corrosión.

2.2.2.1.21 Sistema de captación de biogas

Se deberá construir estructuras verticales de 60 a 100 cm de lado a manera de chimenea, con malla y varilla, rellenos con piedra, esta estructura se desplantará 30 cm abajo del fondo del relleno y en la parte superior se cubre con una placa de concreto, dejando un tubo con cuello de ganso, u otro sistema dependiendo de la cantidad generada de gas y el uso que se le de.

Se deberán instalar 2 pozos por hectárea de relleno. Independientemente del sistema de control que se use, el biogas que sea venteado o extraído, deberá ser quemado. El diseño de la instalación y del quemador deberá reunir las condiciones adecuadas para un óptimo funcionamiento.

2.2.2.1.22 Sistema de monitoreo para biogas

El sistema de monitoreo de biogas será utilizado para aquellos rellenos sanitarios que sean construidos en oquedades, barrancas, depresiones, zanjas, etc., o en el caso que exista el contacto directo de residuos sólidos con paredes, en las cuales se pueda presentar la migración de biogas de forma horizontal. Los sistemas de monitoreo para identificar la migración de biogas estarán integrado por pozos distribuidos a lo largo del perímetro del relleno sanitario. Estos se construirán con una separación máxima de 50 m entre pozo y pozo y a una distancia mínima de 2 m del límite de los residuos sólidos. La profundidad máxima será igual al espesor de residuos sólidos más un metro.

2.2.2.1.23 Área de amortiguamiento

El área de amortiguamiento deberá diseñarse y construirse en un espacio perimetral que fluctúe entre 15 y 30 m. Esta franja deberá estar forestada con especies vegetales que reduzcan la salida de polvo, ruido y materiales ligeros durante la operación.

2.2.2.1.24 Almacén y cobertizo

Se deberá construir un cobertizo para guardar equipo, herramienta, materiales que sean de uso para el relleno, el tamaño dependerá del equipo que se disponga, camionetas, trascavos y deberá tener en el frente un patio de maniobras lo suficientemente grande, para poder recibir vehículos que vengan a descargar materiales al almacén.

2.2.2.1.25 Área administrativa

El área administrativa deberá contar con espacio suficiente para la instalación de las oficinas respectivas, así como el mobiliario y equipo que se requiera.

2.3 PROYECTO DE RELLENO SANITARIO

Para la elaboración de un proyecto de relleno sanitario, se requiere de distintos estudios previos, así como de diversos cálculos. Aún cuando existen distintos criterios de diseño, en este trabajo se presentan los criterios de diseño contenido en el Manual de Operación de un Relleno Sanitario publicado por la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), por considerarlo de aplicación nacional.

La selección de un sitio es el primer paso en el diseño de un relleno sanitario. La importancia de una adecuada planeación del proceso de selección es vital para asegurar que el diseño cumpla con todos los requerimientos que aseguren su adecuada ubicación y futura operación, por lo cual también se toman en cuenta los factores ambientales, económicos, sociales y políticos. El objetivo del estudio es encontrar un sitio donde la disposición de residuos sólidos pueda realizarse económicamente con el mínimo trastorno ambiental y la salud humana.

De forma general un relleno sanitario debe contar con las siguientes características:

- Compatibilidad con los planes de uso de suelo, del área en que asienta.
- Fácilmente accesible en cualquier clima, para los vehículos esperados durante su etapa de operación.
- Contar con medidas de seguridad, contra la potencial contaminación del agua superficial y subterránea.
- Contar con medidas de seguridad, contra el movimiento incontrolado del gas originado por los residuos depositados.
- Contar con la cantidad adecuada de materia de cobertura, de fácil manejo y compactación.

- Estar ubicado en un área donde la operación del relleno no impactará en forma negativa los recursos sensibles del ambiente.
- Ser lo suficientemente grande para recibir los residuos de la comunidad por servir durante un intervalo de tiempo razonable.
- Ser el sitio más económico disponible y cumplir con los requisitos para la disposición de residuos sólidos, conforme a las restricciones de la legislación aplicable o en su defecto conforme a los criterios internacionalmente aceptados.

2.3.1 Metodología de Selección del Sitio

El proceso de selección de sitios consiste en las siguientes etapas:

2.3.1.1 Identificación y evaluación de zonas de estudio

El primer paso es la determinación del radio máximo del área de estudio, con base en las distancias de transporte desde las estaciones de transferencia o los centroides de las áreas potenciales de servicio; y el segundo paso, la determinación de las restricciones legales, físicas, demográficas, sociales, estéticas y sanitarias. Una forma de identificar las zonas factibles es a través de la utilización de acetatos que se superponen sobre un plano, cada acetato identifica las áreas con limitaciones moderadas o severas para determinado criterio; los criterios que se utilizan son los siguientes:

- Geología.
- Hidrología subterránea.
- Zonas de preservación ecológica.
- Zonas susceptibles de desarrollo urbano.
- Hidrología superficial.
- Uso potencial del suelo.
- Topografía.
- Infraestructura de comunicación y conducción.
- Importancia arqueológica e histórica.
- Edafología.
- Climatología lluviosa.
- Climatología en sequía.

Una vez, sobrepuestos los acetatos con los criterios en donde se identifican aquellas áreas con limitaciones, se procede a descartarlos y ha enfocar el análisis sobre aquellas zonas que tienen vocación para los fines perseguidos.

2.3.1.2 Identificación de sitios potenciales

Una vez conocidas las áreas que pueden ser estudiadas y después de establecer el tamaño del relleno requerido para recibir los residuos del área poblacional o urbana de interés, por un cierto número de años, la búsqueda de

sitios viables dentro de dicha área puede comenzar, manteniendo siempre presente las restricciones tanto técnicas como legales, que se estudien para la ubicación de sitios.

2.3.1.3 Evaluación y cribado de los sitios potenciales

En esta etapa se toma en cuenta consideraciones técnicas, económicas y de aceptación pública. Normalmente se recomienda realizar la investigación de 3 a 5 sitios potenciales e identificar los problemas de cada uno, ya que las investigaciones de campo pueden proporcionar información complementaria.

Las consideraciones técnicas son las siguientes:

- Consideraciones técnicas.
 - a) Distancia de transporte.
 - b) Tamaño y vida del sitio.
 - c) Topografía.
 - d) Agua superficial.
 - e) Suelos y geología.
 - f) Agua subterránea.
 - g) Cantidad y compatibilidad del suelo (material de cobertura)
 - h) Vegetación
 - i) Áreas ambientalmente sensible.
 - j) Áreas de importancia arqueológica e histórica.
 - k) Acceso al sitio.
 - l) Uso de suelo.
- Consideraciones económicas.
- Consideraciones de aceptación pública.

2.3.1.4 Selección final del sitio

En esta etapa final se debe considerar, además de los resultados del proceso de evaluación y clasificación de los sitios, las alternativas de uso del sitio terminado y determinar el uso para cada sitio potencial. El mejor sitio será aquel cuyo uso final sea acorde con los planes de desarrollo de la zona en que se asienta y además presente la mayor prioridad en la clasificación realizada previamente.

2.3.2 Diseño de rellenos sanitarios

El diseño del sistema de disposición final debe mantenerse muy presente las metas primordiales las cuales son:

- Cumplir con toda las regulaciones aplicables.

- Proteger el ambiente físico (agua subterránea, agua superficial, suelo y aire).
- Minimizar las molestias de la operación (ligeros, polvo, fuego).
- Minimizar los costos (inicial, operación y total).
- Minimizar el impacto a cuerpos de agua, controlando e impidiendo escurrimientos superficiales.
- Minimizar el tiempo de descarga a los usuarios.
- Proteger a los trabajadores y usuarios.
- Optimizar el espacio del relleno sanitario y prolongar al máximo la vida útil.
- Mantener la estética del lugar.

El uso final del relleno debe ser considerado durante la fase de diseño, a fin de garantizar el mejor uso futuro del área. La planeación en la fase más temprana posible minimizará los costos y maximizará la utilidad del sitio después de la clausura.

Para asegurar un diseño efectivo se tiene la siguiente secuencia de fases.

2.3.2.1 Determinación de las cantidades y características de los residuos sólidos por disponer

- Actual.
- Proyectada.

2.3.2.2 Recopilación de información para el sitio

- a. Preparación de planos de las condiciones del sitio (dentro y fuera).
- b. Preparación de planos base de las condiciones existentes cerca del sitio.
 - Propiedades aledañas.
 - Topografía y pendientes.
 - Cuerpos de agua superficial.
 - Caminos.
 - Instalaciones.
 - Usos del suelo.
- c. Recopilación de información geohidrológica y preparación de planos del sitio.

- Suelo (profundidad, textura, estructura, densidad, porosidad, permeabilidad, humedad, facilidad de excavado, estabilidad, pH y capacidad de intercambio catiónico).
- Lecho rocoso (profundidad, tipo, presencia de fracturas y localización de afloramientos).
- Agua subterránea (profundidad promedio, fluctuaciones estacionales, gradiente hidráulico y dirección de flujo, velocidad de flujo, calidad y usos).

d. Recopilación de datos climatológicos.

- Precipitación.
- Evaporación.
- Temperatura.
- Días de helada.
- Dirección de vientos.

e. Identificación y evaluación de la regulación.

- Leyes federales, estatales y locales.
- Normas y estándar de diseño.

2.3.2.3 Diseño del área de relleno

a. Selección del método de operación: basado en la topografía, tipo de suelo, lecho rocoso y profundidad del acuífero.

b. Especificaciones de dimensiones de diseño.

- Ancho, altura, profundidad de celda.
- Espesor de cubierta diaria, intermedia y final.

c. Especificaciones de los elementos de la operación.

- Uso de la cubierta.
- Método de aplicación de cubierta.
- Requerimientos de importación de material de cubierta.
- Requerimiento de equipo.
- Requerimiento personal.

2.3.2.4 Elementos de diseño

a. Control de lixiviados.

b. Control de biogas.

c. Control de escurrimientos.

d. Caminos de acceso.

e. Áreas de trabajo especial.

- f. Manejo de residuos especiales.
- g. Estructuras.
- h. Instalaciones.
- i. Cercado.
- j. Alumbrado.
- k. Caseta de vigilancia.
- l. Pozos de monitoreo.
- m. Paisaje.

2.3.2.5 Preparación del diseño

- a. Desarrollo preliminar del plan de las áreas de relleno.
- b. Desarrollo de los planos del relleno.
 - Planos de excavación.
 - Secuencia de llenado.
 - Perfil final.
 - Controles del sitio.
- c. Calculo de volumen de residuos sólidos, volumen de material de cubierta requerido y vida útil.
- d. Desarrollo de los planes definitivos.
 - Áreas de llenado normal.
 - Áreas de trabajo especial.
 - Control de lixiviados y biogas.
 - Control de aguas superficiales.
 - Caminos de acceso.
 - Instalaciones generales.
 - Cercado.
 - Instalaciones de monitoreo.
- e. Preparación de plano en planta y con secciones transversales.
 - Desplante.
 - Perfil final.
 - Fases intermedias de llenado.
- f. Preparación de detalles constructivos.
 - Control de lixiviados y biogas.
 - Control de aguas superficiales.
 - Caminos de acceso.
 - Pozos de monitoreo.
- g. Preparación del plano de uso final.
- h. Preparación del informe.
- i. Preparación del impacto ambiental.

- j. Manual del manual de operación.
- k. Preparación del manual de operación.

Los principales métodos para disponer los residuos sólidos en un relleno sanitario se clasifican en:

- a) **Método de Trinchera.** Es usado donde el nivel de aguas freáticas es profundo, las pendientes del terreno son suaves y las trincheras pueden ser excavadas utilizando equipos normales de movimiento de tierra. Este método consiste en depositar los residuos sobre el talud inclinado de la trinchera (talud 3:1), donde son esparcidos y compactados, en capas, hasta formar una celda que después será cubierta con el material excavado de la trinchera, con una frecuencia mínima de una vez al día esparciéndolo y compactándolo sobre los residuos, como se muestra en la figura 2.4.

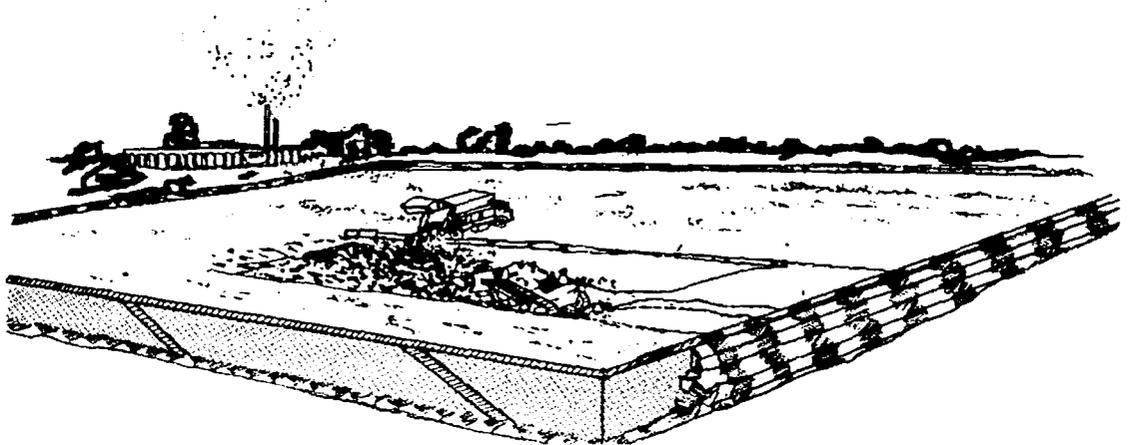


Fig. 2.4 Relleno sanitario por método de trinchera.

- b) **Método de Área.** Es usado en cualquier tipo de terreno disponible como canteras abandonadas, inicio de cañadas, terrenos planos, depresiones y ciénegas contaminadas; un punto importante en este método para que el relleno sea económico, es que el material de cubierta debe transportarse de lugares cercanos a éste. El método es similar al de trincheras y consiste en depositar los residuos sobre el talud inclinado, se compactan en capas inclinadas para formar la celda que después se cubre con tierra. Las celdas se construyen inicialmente en un extremo del área a rellenar y se avanza hasta terminar en el otro extremo, como se muestra en la figura 2.5.

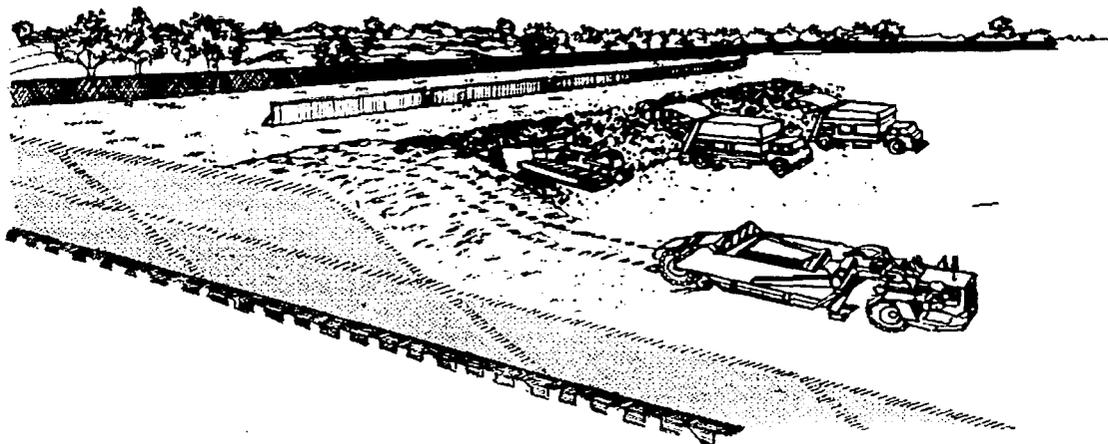


Fig. 2.5 Relleno sanitario por método de área.

c) **Método Combinado.** En algunos casos cuando las condiciones geohidrológicas, topográficas y físicas del sitio elegido para llevar a cabo el relleno sanitario son apropiadas, se pueden combinar los dos métodos anteriores, se inicia con el método de trinchera y posteriormente se continúa con el método de área en la parte superior. Otra variación del método combinado, consiste en iniciar con un método de área, excavando el material de cubierta de la base de la rampa, formándose una trinchera, la cual servirá también para ser rellena. Los métodos combinados son considerados los más eficientes y que permite ahorrar el transporte del material de cubierta y aumenta la vida útil del sitio, como se muestra en la figura 2.6.

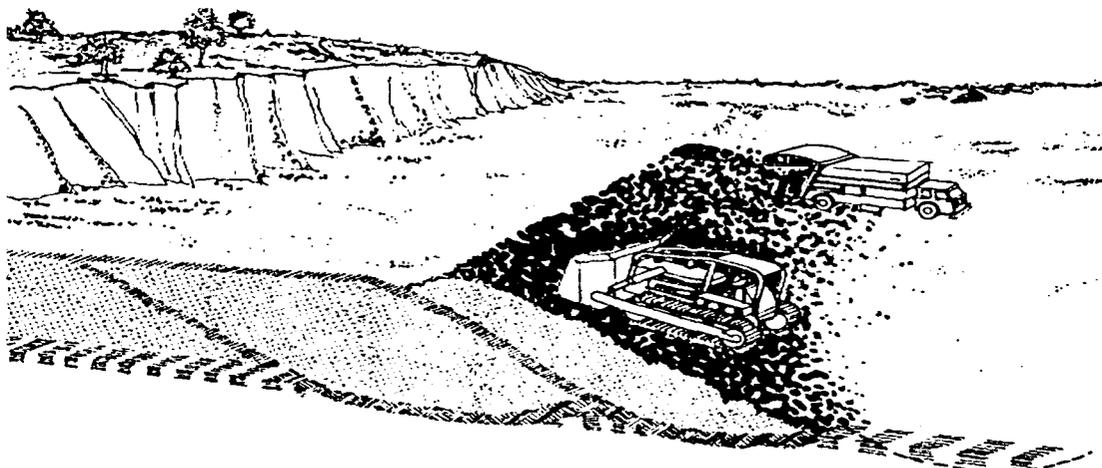


Fig.2.6 Relleno sanitario por el método combinado.

2.4 CONSTRUCCIÓN

La operación de un relleno sanitario municipal esta determinado por muchos factores, los cuales varían de un sitio a otro. Debido a que un relleno se construye y opera durante varios años, es importante que el personal consulte continuamente dicho plan para asegurar el cumplimiento a largo plazo del mismo. Después de recibir la aprobación del diseño de la instalación requerida por parte de las autoridades correspondientes, puede entonces comenzar la preparación y construcción del sitio. A continuación se presentan las etapas a completar para la preparación y construcción del sitio.

2.4.1 Etapas para la preparación y construcción del sitio

1. Desmante.
2. Despalme de la capa superficial de suelo
3. Instalación del drenaje para aprovechamiento
4. Excavación de áreas de relleno
5. Apilamiento de materiales de cubierta diaria.
6. Construcción de instalaciones de protección ambiental (de acuerdo a su necesidad):
 - a) Capas para relleno con sistemas de recolección de lixiviados.
 - b) Sistemas de monitoreo del agua subterránea.
 - c) Equipo para control de biogas.
 - d) Equipo para monitoreo de biogas.
7. Preparación de caminos de acceso.
8. Construcción de instalaciones de apoyo:
 - a) Edificio de servicios.
 - b) Instalaciones para empleados
 - c) Báscula.
 - d) Instalaciones de combustible.
9. Instalación de servicios públicos:
 - a) Electricidad.
 - b) Agua.
 - c) Drenaje.
 - d) Teléfono.
10. Construcción de cercas:
 - a) Perimetrales.
 - b) De la entrada.
 - c) De la puerta y señal de entrada.
 - d) Control de basura.

11. Preparación de los documentos de construcción (continuamente durante la misma).

2.4.2 Requerimientos de compactación

El grado de compactación es un parámetro crítico en la extensión de la vida útil de un relleno. Para alcanzar "in Situ" altos grados de compactación del desperdicio, puede ser necesario utilizar un compactador. En los proyectos de Normas Oficiales Mexicanas referentes a residuos sólidos municipales no se encontró algún parámetro de referencia para la compactación de los residuos sólidos. Aunque tampoco especifica el grado de compactación requerido para el material de cubierta, por aspectos constructivos se utiliza un 60 a 70 % de la Prueba Proctor Estándar.

El número de pasadas que la máquina debe dar sobre los residuos sólidos para alcanzar la compactación mínima depende de la presión de las llantas de la máquina, compresibilidad del desperdicio, tierra y requerimiento de combustible, costo de mano de obra y carga de trabajo. Generalmente se recomienda de 3 a 5 pasadas para alcanzar la compactación óptima "in situ" del desperdicio.

Aunque al dar más pasadas sobre los residuos sólidos los compactará de un mayor grado, el esfuerzo disminuye después de 6 pasadas.

La figura 2.7 muestra la relación entre el espesor de la capa de residuos sólidos, número de pasadas y la densidad del residuo sólido compactado encontrado en una prueba de campo para un tipo particular de máquina y procedimiento de operación.

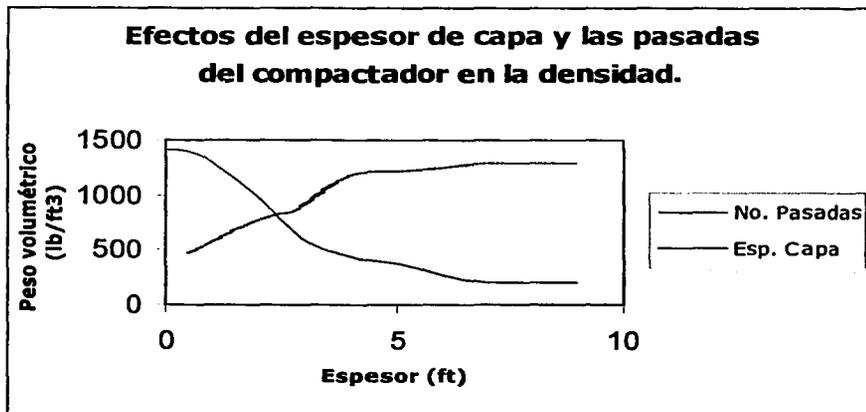


Fig. 2.7 Gráfica espesor de la capa - número de pasadas del compactador - densidad del residuo compactado.

El rápido descenso de la densidad después de un espesor de 50 cm (1.5 pies). Además, la compactación de residuos sólidos más eficiente deberá estar en un número de capas delgadas hasta completar el espesor total de la celda y no en capas de espesor mayor a 60 cm (2 pies).

La pendiente del frente de trabajo también afecta el grado de compactación adecuado. Mientras que el talud aumenta, la presión de compactación vertical disminuye. El más alto grado de compactación es alcanzado en el menor talud. Sin embargo, la factibilidad de desarrollar frentes de trabajo con pendiente pequeña tiene que ser comparado contra el gran tamaño de área sobre la cual tiene que ser esparcido el residuo sólido.

2.4.3 Suelo ideal para el sitio

Los rellenos sanitarios deberán estar localizados en sitios de suelos poco permeables (ejemplo arcilla), los cuales restringen el movimiento de los lixiviado y del gas. Un relleno construido sobre una formación permeable como grava, arena o roca fracturada puede representar una amenaza significativa a la calidad del agua subterránea.

Si las únicas áreas disponibles tienen pocas condiciones óptimas para la construcción del relleno puede ser necesario importar material al sitio para la construcción de las capas y de la cubierta; como alternativa existe la instalación de geomembranas.

En suelos arcillosos, donde el movimiento del agua es lento y el nivel freático es somero, un sistema de recolección de agua subterráneas permitirá una exitosa operación del relleno. Normalmente éste tipo de suelos sería excluido de la consideración, pero al establecer un criterio separado, y proporcionando sistemas especiales puede construirse el relleno.

2.4.4 Construcción de la sub-base

La sub-base se refiere a la superficie del terreno sobre la cual se construirá el relleno. Es necesario compactar y nivelar la sub-base para que dicha capa sea construida con facilidad. Si el material de la sub-base es arenoso entonces se deberá compactar del 85 al 90% de la densidad relativa. Debe notarse que la densidad Proctor versus el contenido de humedad no se mantiene en materiales de grano grueso. El peso volumétrico deberá verificarse en puntos de una cuadrícula de 30 metros de distancia. Dependiendo del tipo de residuos sólidos y las propiedades del suelo, se puede elegir usar una cuadrícula más pequeña o más grande. Un rodillo vibratorio puede ser empleado para compactar suelo arenoso. Sin embargo, si la arena se encuentra en un estado denso la aplicación de vibración la aflojará, por lo que se recomienda verificar el peso volumétrico "in situ" antes de elegir el equipo de compactación, para determinarlo se puede utilizar un dispositivo nuclear u otros dispositivo estándar.

2.4.5 Construcciones de capas

Generalmente se usan dos tipos de especificaciones para construcción. Una denominada "tipo de trabajo" en la que al constructor se le indica que hacer y como hacerlo y otra denominada "por desempeño", en la que se requiere un resultado final específico.

En la construcción de capas puede ser riesgoso usar una especificación por "tipo de trabajo" debido a que todos los puntos de construcción y el control de calidad no se han estandarizado aún.

Se usan tres tipos de materiales para la construcción de capas: arcilla, suelo-bentonita y membrana sintética (Geomembrana HPDE). Las técnicas usadas para construir una capa usando los dos primeros materiales son muy similares, por lo que, la construcción con estos se agrupa en un solo punto.

2.4.5.1 Construcción de capas con arcilla y con suelo-bentonita

El tamaño del terrón de la arcilla es importante debido a que el contenido de humedad del suelo antes de la construcción es menor que la humedad óptima para la que se propone la compactación. Humedecer la arcilla toma tiempo y si el tamaño del terrón utilizado en el campo para las pruebas de permeabilidad es mayor que el usado en el laboratorio, entonces la masa de arcilla puede no alcanzar el mismo contenido de humedad en un periodo corto. El tipo de equipo usado para compactación juega un papel importante al desarrollar una baja permeabilidad. Se recomienda iniciar la compactación con un terrón de 2.5 cm de diámetro. Se puede usar arados o discos para romper los terrones.

La compactación de arcilla debe hacerse con la humedad óptima permitiéndose un tiempo adecuado para asegurar una distribución uniforme de la humedad. Una distribución no uniforme en la capa de arcilla puede deberse a un terrón grande, distribución no uniforme por los rociadores e insuficiente tiempo de curado permitido para que penetre la humedad. Una vez iniciado el proyecto de construcción de una capa, debe terminarse por completo, por que si la construcción se detiene, deberá removerse y recompactarse.

Se usan tres tipos de rodillo para la compactación:

1. Rodillo pata de cabra (autopropulsado o halado)
2. Rodillos vibratorios (tambor liso o pata de cabra)
3. Rodillos con neumáticos.

Se recomienda un rodillo pata de cabra no vibratorio para la construcción de una capa de arcilla debido a que puede proporcionar una compactación por amasado y además de que tiene la habilidad de romper los terrones. Un rodillo tipo vibratorio o rodillo de neumáticos puede no proporcionar el tipo de orientación de las partículas para construir una capa de baja permeabilidad. La vibración puede aumentar temporalmente la presión de poro dentro de los

terrones de arcilla, lo cual aumenta el esfuerzo cortante; como resultado se necesitará más presión para construir una capa uniforme, homogénea y bien compacta. La compactación estática produce una estructura con grandes poros. El uso de un rodillo pata de cabra pesado es preferible para compactar arcilla. El tamaño del relleno deberá ser considerado en la selección del equipo, debido a que un equipo grande necesita grandes radios de giro. Sin embargo, un equipo pequeño puede proporcionar la presión requerida para alcanzar una capa de baja permeabilidad.

2.4.5.2 Construcción de capas con membrana sintética

Los geosintéticos son materiales manufacturados de varios tipos de polímeros usados para mejorar, aumentar y hacer posible proyectos ambientales económicos. Éstos proporcionan las siguientes funciones:

- Separación.
- Refuerzo.
- Filtración.
- Drenaje.
- Barrera de líquidos.

El geosintético más usado es la Geomembrana HPDE, que son hojas de polímeros de alta densidad, impermeables, usadas como barreras para contener los residuos sólidos. Se hace notar que nada es estrictamente impermeable en un sentido estricto, es decir, se habla de permeabilidad relativa comparada con otros materiales como la arcilla natural, la cual tiene usualmente una permeabilidad aproximada de 10^{-7} cm/s, mientras que la permeabilidad equivalente de una geomembrana oscila entre 10^{-11} a 10^{-13} cm/s.

Las actividades de construcción para instalar una membrana sintética no son tan estrictas como para las capas de arcilla, aunque las actividades durante su instalación son reducidas, es necesario tener extremo cuidado durante su instalación.

La sub-base debe ser preparada apropiadamente para la instalación de la membrana sintética. Debe compactarse de un 85 % a un 90% de la densidad relativa para arenas, y 90 % de la prueba Proctor modificada para arcillas o suelos mejorados. No debe contener partículas mayores de 1.25 cm, ya que partículas mayores pueden causar protuberancias en la capa y perforaciones. Debe usarse un herbicida sobre la sub-base por debajo de la membrana para inhibir el crecimiento de vegetación. En ningún caso deberá permitirse la circulación de vehículos por encima de la capa; solo se permitirá el equipo de unión, el equipo de prueba de unión y el número mínimo de personal necesario. Deberá verificarse que la sub-base no presenta depresiones antes de colocarlas. La colocación de la membrana deberá evitarse durante la ocurrencia de vientos con velocidad de 24 Km./h o mayores. La unión deberá realizarse dentro de la temperatura especificada por el fabricante.

La construcción deberá realizarse a temperatura entre 4 y 27 °C debido a que la membrana absorbe calor fácilmente. Se necesita un traslape de 15 a 23 cm. Las membranas sintéticas se deterioran debido a los rayos ultravioleta, por lo que deberán ser cubiertos si se mantiene en el sitio con una cortina no transparente.

Las membranas sintéticas deben ser cubiertas con suelo o residuos sólidos tan pronto como sea posible, por lo menos deberán esparcirse sobre ésta 30 cm de espesor de arena. El suelo deberá formar una película para asegurar que el tamaño máximo de partículas sea 1.25 cm o menor, el cual deberá ser empujado cuidadosamente por un bulldozer ligero. Deberá evitarse tirar suelo sobre la membrana y deberán crearse una o dos rutas de acceso con 60 a 90 cm de suelo para el uso de equipo más pesado, con propósito de movimiento de suelo. El daño de la membrana debido a tráfico puede ser severo, pero probablemente permanecerá sin detectarse. La primera capa de residuos sólidos deberá ser esparcida y compactada con vehículos ligeros. Es preferible no compactar los primeros 30 cm de residuos sólidos.

2.4.5.3 Construcción de mantos de drenaje con arena

La construcción involucra más que solo vaciar arena sobre la capa terminada. La arena deberá ser empujada cuidadosamente para que los vehículos no circulen directamente sobre la capa. Se deberá emplear un bulldozer ligero en esta operación. Si el manto de drenaje se construye sobre una capa sintética, deberá entonces tenerse sumo cuidado para protegerla. No debe usarse una capa de grava como material de drenaje debido a que los finos pueden emigrar y saturar el manto. Puede diseñarse un filtro graduado para utilizar este tipo de material.

a) Construcción de zanjas para recolección de lixiviados.

La localización de la línea para recolección de lixiviados deberá seguirse estrictamente. El espaciamiento de tubería es un punto crítico para minimizar las fugas a través de las capas. Debe colocarse una tubería de recolección de lixiviados encima o dentro de la capa de la base del relleno sanitario. Cuando la tubería de recolección se instale en una zanja, deberá tenerse cuidado para asegurar que dicha zanja tenga la pendiente de diseño (0.5 % mínimo) hacia la estructura de recolección. Si se instala una capa de membrana sintética sobre una capa de arcilla o suelo mejorado, entonces deberá usarse una pieza extra de membrana sintética, como se muestra en la figura 2.8. Debe evitarse el empalme de la membrana sintética en una distancia de 90 cm de la zanja de recolección de lixiviados. La grava usada en la zanja y la tubería de recolección deberán colocarse cuidadosamente. La tubería de recolección deberá conectarse cerca del sitio de la zanja para que no se tenga que arrastrar sobre la capa de la base del relleno, ya que se puede rasgar la membrana sintética. Se recomienda que el manto de drenaje sea esparcido sobre la capa sintética, en toda su extensión excepto a los 15 cm de distancia e la zanja de

recolección. Esto permitirá el movimiento de vehículos ligeros sobre la capa para colocar la grava y la tubería de recolección.

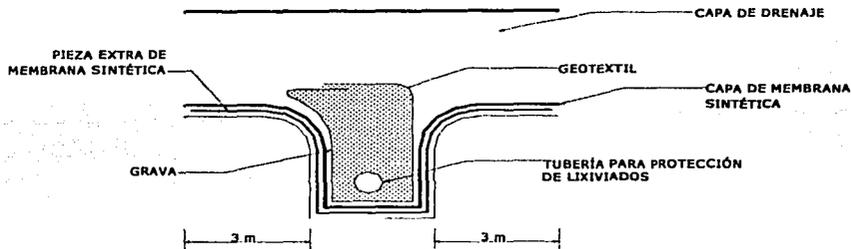


Fig. 2.8 Detalle de la zanja para recolección de lixiviados con membrana sintética.

b) Construcción de dobles capas.

La construcción se guía para cada capa de material. En este caso, la construcción más difícil es aquella en que ambas capas son membranas sintéticas, ya que la membrana sintética inferior tiene mayor probabilidad de dañarse, lo que es difícil de detectar. La fuente principal de daño es probablemente por el tráfico vehicular, el cual se debe evitar al máximo durante la construcción de la capa principal.

c) Construcción de la cubierta del relleno

La construcción de la cubierta es similar a la construcción de capas. La capa inferior a la de baja permeabilidad, llamada "capa de ventilación de gas", deberá construirse usando arena pobremente graduada (SW o SP). Se recomienda un análisis de tamaño de grano cada 400 m³ de material usado, con propósito de control de calidad. La capa deberá ser compactada del 85 al 90 % de la densidad relativa con el fin de proporcionar una sub-base firme para la capa de baja permeabilidad colocada encima. La densidad deberá probarse en una cuadrícula de puntos a cada 30 m.

La capa colocada encima de la baja permeabilidad, llamada "capa de cubierta" deberá ser del tipo SM, SC o ML. Puede usarse una mezcla de suelo más fino con arena si no se dispone de suelo limoso. Con propósitos de control de calidad se recomienda un análisis por cada 765 m³ de material usado. Esta capa no deberá ser compactada para ayudar a la penetración de la raíz.

La colocación de la capa superior de suelo deberá ser hecha tan pronto como se termine la construcción de la capa de cubierta. No deberá permitirse la entrada a equipo pesado sobre la superficie terminada. Deberá plantarse una combinación de césped y vegetación de tipo arbusto capaz de sobrevivir en estas condiciones (Bagchi, 1994).

2.5 OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

La operación y el mantenimiento adecuado de un relleno sanitario son necesarios para:

- Evitar que el relleno sanitario se convierta en un tiradero a cielo abierto.
- Reducir los impactos negativos potenciales en aire, agua y suelo.
- Minimizar o eliminar los impactos hacia las propiedades adyacentes.
- Reducir los costos de operación (a largo plazo).
- Incrementar la capacidad volumétrica y ampliar al máximo la vida útil.
- Satisfacer las necesidades de disposición final de residuos sólidos de la región.

Los procedimientos de operación para un relleno sanitario pueden variar, dependiendo de diferentes factores, como son: el tipo de relleno, el clima, las cantidades, tipos de residuos por recibir, la regulación a nivel local, estatal, etc.

Cualquier relleno sanitario debe contar con un plan de operación y desarrollo futuro; esos planes definirán como se desarrollará un proyecto de relleno sanitario, abarcando desde la fase de construcción de la primera celda de residuos sólidos hasta la fase final del sitio.

Las partes de un plan para la operación de un relleno sanitario contendrán como mínimo los siguientes pasos:

- Manejo de residuos en el frente.
- Dirección de flujo del tráfico.
- Excavación, transporte y colocación cotidiana del material de cubierta.
- Inspección diaria del sitio y mantenimiento.
- El registro rutinario de la carga que ingresan los vehículos recolectores.

El horario de operación del relleno sanitario, será impuesto por el programa de recolección. Generalmente los sitios de disposición final son abiertos de las 6:00 a.m. a las 6:00 p.m. Las horas de operación deben tomar en consideración las condiciones de tráfico local. El horario puede modificarse, basándose en la cantidad de residuos sólidos por recibir durante una determinada época.

2.5.1 Control de acceso y operación de báscula

La caseta de control y el área de pesaje representan la primera fase de las operaciones del relleno sanitario y constituye el principal control para:

- Detectar residuos sólidos prohibidos.
- Localizar irregularidades en los vehículos.
- Dirigir los vehículos al área adecuada.
- Comunicarse con el conductor.
- Registrar la entrada de los vehículos.

Es indispensable que los rellenos sanitarios cuenten con un sistema de pesaje, dado que debe conocer la cantidad de residuos sólidos que ingresan, con el fin de establecer parámetros de control de la operación, así como para asignación de tarifas y cobros.

El operador de la báscula registrará en la bitácora los datos de cada vehículo, pesarlo, registrar el peso de la tara (si se conoce), cobrar, generar facturas o recibos y documentos de pesaje, pesar los vehículos después de la descarga para generar los pesos de tara y administrar esta parte de la operación.

2.5.2 Almacenamiento de residuos en el sitio

Aunque no es deseable, en algunos casos es necesario almacenar residuos, fuera de las áreas de relleno, principalmente debido a imprevistos o en otros casos porque no siempre es conveniente permitir el acceso hasta los frentes de trabajo a los pequeños generadores. Con estas perspectivas se recomienda que el almacenamiento temporal de residuos sólidos en este tipo de instalación se realice a los siguientes lineamientos:

- Sé prohíbe la descarga de residuos sobre el suelo, fuera de los frentes de trabajo.
- En caso de no ser conveniente el acceso de los pequeños generadores a los frentes de trabajo, se deberá destinar un área para el almacenamiento de residuos y colocar contenedores con tapa para recibir sus residuos sólidos, estas áreas deben ser accesibles y estar cerca de la entrada del relleno, sin que obstruyan las vías de acceso.
- Esta área para almacenamiento deberá estar fuera de zonas de inundación y contar con los letreros y señalamientos alusivos a su función.
- El acceso a esta área sólo será permitido a los pequeños generadores que cumplan con los requisitos que establezca la administración del relleno.
- Los contenedores para almacenamiento únicamente podrán ser movidos durante las operaciones de recolección y limpieza.
- Los contenedores tendrán que ubicarse en áreas bien ventiladas y preferentemente a resguardo de los elementos climatológicos.

2.5.3 Prácticas de disposición de residuos

El método de trinchera es muy difícil de ejecutar, debido a que los diseños actuales demandan la implementación de un sistema de impermeabilización (natural o artificial) de la base del relleno y de sistemas de captación y desalajo de lixiviados. El método de área es actualmente el más utilizado, principalmente porque se adapta con mayor facilidad a la existencia de la infraestructura mencionada. En todo caso los diseños actuales, admiten excavaciones mayores para alcanzar la profundidad deseada y proceder a la construcción de sistemas de impermeabilización y captación de lixiviados posteriormente operar el sitio mediante el método de área.

La celda diaria constituye el elemento constructivo primario. Los residuos sólidos recibidos son esparcidos y compactados en capas dentro de un área perfectamente delimitada y hasta un volumen definido. Al término de cada día de operación, el área ya ocupada con residuos compactados, es cubierta completamente con una capa delgada de tierra, que posteriormente es compactada. De esta forma, los residuos compactados y cubiertos diariamente con este material, constituyen una celda. Una serie de celdas adyacentes en forma lateral o transversal y con una misma altura, forman una franja. Una serie de franjas adyacentes y con una misma altura, forman una capa y una o más capas, pueden formar el total del área de relleno sanitario o una etapa del mismo.

Los pasos para construir la celda son los siguientes:

- Descargar los residuos sólidos sobre el área que conformará el correspondiente frente de trabajo.
- El nivel de la superficie superior de la celda deber ser entre 2 y 5 %, mientras que la altura de celda comúnmente es de aproximadamente 2.4 a 3.5 m
- Las dimensiones deberán coincidir con el volumen de los residuos compactados en el sitio, al final del día de trabajo.
- El ancho del frente de trabajo depende del número de vehículos que transportan residuos al área de operación y la cantidad de equipo disponible para el esparcido y compactación, el ancho del frente de trabajo no deberá ser reducido a menos de tres veces el ancho de la hoja topadora del equipo utilizado y no exceder los 45 m. La densidad recomendable para los residuos sólidos de una celda terminada es superior a 600 kg/m^3 .
- Esparcir los residuos sólidos en el frente de trabajo en capas de 0.30 a 0.60 m de espesor.
- Compactar los residuos sólidos con entre 3 y 5 pasadas sobre el talud.
- Una vez compactados los residuos del día, se descargan sobre los mismos el material para la cubierta diaria.
- Esparcir y compactar el material de cobertura, manteniendo un espesor mínimo de 15 cm. Dependiendo del tipo de suelo de donde provenga el material de cubierta, puede requerir un espesor mayor.

La superficie que envuelve la celda diaria terminada y que estará expuesta al ambiente por un período de más de una semana, hasta que se coloque una nueva celda sobre está, sufrirá los efectos de las condiciones climatológicas y posiblemente el frecuente paso de vehículos. Normalmente estas superficies son cubiertas adicionalmente, con una capa de 0.30 m de espesor de tierra compactada. A esta capa se le conoce como cubierta intermedia y tiene la función de proteger a la cubierta diaria y prevenir la intrusión de agua al relleno por un período más largo.

Cuando el relleno ha alcanzado el nivel planeado, se deberá colocar una cubierta final de no menos de 60 cm de espesor. Esta cubierta es necesaria para permitir el tráfico ligero y minimizar los efectos que ocasionan los asentamientos diferenciales, tal como el afloramiento de residuos por el efecto de fracturas y agrietamientos. Esta cubierta, también ayudará a evitar que la lluvia fluya hacia el interior de los residuos confinados. En la figura 2.9 se muestra la morfología de la celda diaria, en la figura 2.10 se muestra la compactación de capas de residuos sólidos.

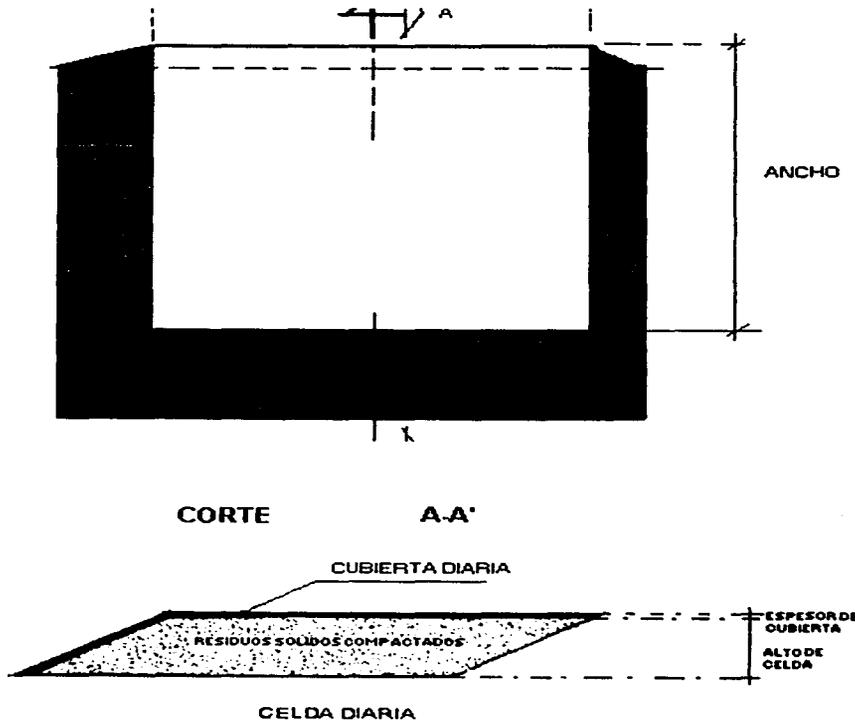


Fig. 2.9 Morfología de la celda diaria.

2.5.4 Uso de maquinaria

La construcción de un relleno sanitario requiere de equipo pesado, conforme al grado de dificultad que presente el sitio para ello. La operación y mantenimiento del equipo ocupa un lugar clave en los costos asociados con la operación de los sistemas de disposición final. Por tal razón, la adecuada selección del equipo por utilizar, debe realizarse de manera racional y tomando en cuenta el método de operación y las condiciones reales de trabajo a las que estarán sujetas.

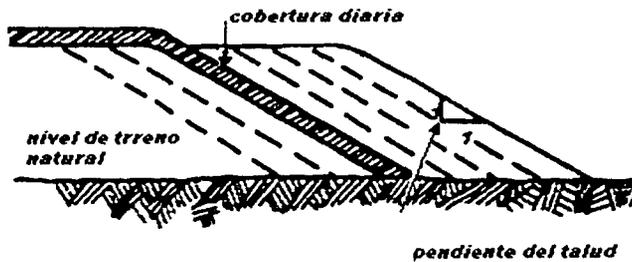


Fig. 2.10 Compactación de capas de residuos sólidos.

Las funciones básicas del equipo para un relleno sanitario caen dentro de las siguientes categorías:

- Preparación del sitio incluyendo desmonte y despalme.
- Compactación y manejo de residuos.
- Excavación, transporte y aplicación de cubierta diaria.
- Esparcimiento y compactación de la cubierta final.
- Funciones de apoyo.

Con base en el tamaño de la instalación, el mismo equipo puede ser utilizado en más de una de las tres categorías.

Los equipos que se utilizan con más frecuencia se muestran en la tabla 2.4 y son:

TABLA 2.4 TIPOS DE EQUIPO.

NOMBRE DE EQUIPO	FUNCIÓN
Buldozers o tractores de orugas con hoja topadora.	Distribuir y compactar los residuos sólidos, así como realizar la preparación del sitio, suministrar la cubierta diaria y final y trabajos generales de movimiento de tierras.
Compactados con ruedas metálicas	Extendido y compactación de residuos sólidos.
Cargadores de neumáticos.	Para excavar suelo suave (por ejemplo, suelos que presentan poca resistencia), cargar el material excavado a los camiones y pick-ups o para transportar ese material a distancias no

	mayores a 50 o 60 m.
Cargadores de Orugas	Estas máquinas pueden desarrollar funciones similares a las de los cargadores neumáticos. Los cargadores de oruga también son recomendables para excavar suelo macizo o duro. Su distancia óptima para transporte de materiales no debe exceder de los 30 m; pueden utilizarse en el manejo de residuos sólidos (extendido y compactación). También pueden ser utilizados para conformar y nivelar la cubierta de las celdas.
Excavadoras de oruga	Para excavar el suelo y cargar vehículos de transporte, así como para aplicar la cobertura diaria de los residuos sólidos (método de trinchera). Este equipo también puede ser utilizado bajo ciertas premisas en el movimiento de tierras.

2.5.5 Inspección y supervisión

La inspección y la supervisión en un relleno sanitario son actividades orientadas para asegurar que la operación se realice de manera óptima y en consecuencia evitar problemas económicos, sociales, técnicos y ambientales.

La supervisión, es la acción de observar un trabajo determinado con el propósito de que este se realice correctamente. La inspección, básicamente es la acción de observación para confirmar que un determinado trabajo se realizó adecuadamente, una vez terminado éste.

Las actividades dentro de la supervisión son:

- Verificar que se respete el horario de operación, en caso de no respetarse esto, determinar áreas de descarga para evitar que se haga en lugares no apropiados.
- Hacer visitas aleatorias al lugar donde se lleve a cabo el control de acceso, verificando que éste se realice adecuadamente, a fin de asegurar que tengan acceso sólo camiones y personas autorizadas.
- Verificar que en registro de entradas y salidas se anoten los siguientes datos: lugar de procedencia, número de placas, número económico, hora de ingreso, tipo de camión y peso bruto.
- Supervisar el control de la calidad de los residuos sólidos que ingresan al sitio, a fin de asegurar que no se reciban residuos industriales o peligrosos.
- Verificar el funcionamiento y la operación de la báscula para camiones.
- Vigilar el procedimiento de pesaje de los vehículos recolectores y los de material de cubierta.
- Revisar que los vehículos, al llegar al patio de maniobras, sean orientados para descargar lo más cerca posible al frente de trabajo; y que el patio este organizado y limpio.
- Verificar que la orientación del tráfico y descarga, en el patio de operaciones sea la más adecuada para evitar pérdida de tiempo.

- Verificar que se realice un buen mantenimiento de las herramientas, equipos y dotación de implementos de protección de los trabajadores.
- Verificar que el frente de trabajo este en condiciones operativas en todo momento, aún cuando se presenten lluvias intensas.
- Vigilar que el drenaje en el frente de trabajo sea inmediato y se conduzca al sistema de desagüe.
- Revisar que las celdas por construir cada día, sean identificadas por medio de estacas que fijarán los límites de las mismas, éstos límites serán indicados a los operadores de los tractores.
- Vigilar que se compacten correctamente los residuos y el material de cubierta.
- Observar que los camiones no tiren residuos en su tránsito por el relleno sanitario sino hasta el frente de trabajo.
- Verificar la ejecución del programa del uso de la maquinaria, del llenado de celdas y del diseño de frentes de operación con base en el número de vehículos en un tiempo determinado.
- Presentar un informe completo, con conclusiones de todas las observaciones hechas durante un período determinado de tiempo.

Las actividades de inspección son:

- Verificar que la zona de paso de los vehículos esté lo más firme posible para evitar que se atoren y obstruyan el acceso al frente de trabajo.
- Verificar que el tamaño, distribución, forma de celda y material de cubierta corresponda a lo señalado en el proyecto y las especificaciones. Realizando nivelaciones en: caminos de acceso, piso natural y celdas terminadas.
- Observar que no hallan grietas en las celdas.
- Revisar que las vías de acceso, patio de maniobras, redes de drenaje pluvial y superficie terminada del relleno, se mantengan en buenas condiciones operativas.
- Vigilar que no existan incendios en el relleno sanitario, en caso de que se presenten, la zona deberá ser considerada como de emergencia y el incendio tendrá que ser controlado y abatido inmediatamente por medio de arena o material de cobertura.

Es importante tener control tanto del sitio como de su operación, con la finalidad de poder asegurar que no se causarán molestias a los habitantes más cercanos o a las personas en tránsito por esa zona, ni al ambiente.

Por lo cual se debe tener control de: humedad, de residuos sólidos, ingreso de residuos, etc.

Dentro de la operación se tiene contemplado el control y monitoreo de contaminantes como son: lixiviados y biogas, así como de hundimientos y asentamiento diferenciales, los cuales se analizarán en el siguiente punto.

2.5.6 Mantenimiento y servicio

Dar mantenimiento a una obra es efectuar acciones para conservar la funcionalidad de sus equipos e instalaciones. Y en un relleno sanitario es importante, de no ser así podría ocasionar:

- Graves daños ambientales y con ello rechazo por parte de la población.
- Fallas en el equipo o en las instalaciones y con ello encarecimiento de la obra.

2.5.7 Revisión y reparación de equipo

El equipo mecánico es indispensable en la operación del relleno sanitario. Y para evitar retrasos e incremento de costos en la operación, se precisa: revisarlo constantemente, cuidarlo cuando opera, cambiar las piezas que así lo requieran, y elegir a un operador que además de tener experiencia en la operación del equipo sea capaz de realizar reparaciones pequeñas a las máquinas. Algunas recomendaciones generales sobre mantenimiento y cuidado en la operación de la maquinaria.

La frecuencia de lubricación nunca debe ser inferior a la indicada por los fabricantes y está condicionada además al tipo de trabajo que realice, la carga, el terreno y el tiempo atmosférico.

Comprobar la presión de aire en el sistema de freno y purgar cada mañana los productos de la condensación. Evitar que el depósito de combustible quede con poca carga y limpiarlos frecuentemente.

Controlar la regulación de los inyectores; esta anomalía comúnmente se manifiesta con humo excesivo en el escape.

Realizar el cuidado del filtro de aire, vigilar el nivel de aceite y el nivel de posición de polvo en el recipiente del prefiltro y sopletear la cámara interna del prefiltro.

Quitar el óxido de las terminales de los acumuladores y los cables. Reemplazar los alambres desgastados. Colocarlos limpios y firmes. Es necesario que las baterías estén aseguradas al bastidor y mantener el nivel correcto del líquido.

A continuación se presenta en la tabla 2.5, el mantenimiento preventivo para los diferentes tipos de maquinaria.

También se debe dar mantenimiento adecuado a las instalaciones (camino, báscula, cerca perimetral, oficinas, etc.) para una operación correcta del relleno sanitario.

2.5.8 Caminos interiores

Es indispensable mantener, húmedo los caminos para minimizar los problemas de generación de polvo. Por lo cual se recomienda las siguientes acciones:

- Riego periódico de los caminos con aceite quemado o agua tratada, preferentemente en las horas pico de operación, para evitar la generación de polvo.
- Rellenar los baches para después compactar con pisón de mano.
- Las cunetas de los caminos deberán estar siempre libres de rocas, arena o residuos para evitar su azolvamiento.
- Mantenimiento de las condiciones de rodamiento de los caminos, preferentemente en horas hábiles, para aprovechar el equipo pesado con el que dispone.

TABLA 2.5 MANTENIMIENTO PREVENTIVO.

TIPO DE MAQUINARIA	CAMBIO DE FILTROS	CAMBIO DE ACEITE	AFINACIÓN	ENGRASADO	AJUSTE DE PARTES MÓVILES.
Trascavo de oruga.	Cada 250 hrs.	Cada 250 hrs.		Diario	Semanal
Tractor de orugas	Cada 280 hrs.	Cada 280 hrs.		Diario	Semanal
Rodillo de compactación		Cada 250 hrs.		Diario	Semanal
Motoconformadora	Cada 300 hrs.	Cada 300 hrs.		Diario	Semanal
Pipa de agua.	Cada 3000 Km	Cada 3000 Km	Cada 5000 Km.	Cada 3000 Km	Cada 3000 Km

2.5.9 Báscula

La báscula es un elemento importante dentro del relleno sanitario, pues gracias a ella se conocerá el peso de los residuos sólidos que ingresan, para su mantenimiento se sugiere los siguientes cuidados:

- Calibrar constantemente la báscula (una vez al mes).
- Proporcionar un servicio regular de engrasado.
- Mantenerla limpia de polvo, residuos y lodo el área circundante a la báscula, así como revisar el interior para verificar que no se han introducido residuos, y así retirarlos.
- Pintarla al menos uno o dos veces al año.

2.5.10 Cerca perimetral

La cerca perimetral es la estructura que delimita el área del predio correspondiente al relleno sanitario, consta de una cerca de malla ciclónica, su función es impedir el paso de animales domésticos y de personas ajenas al sitio de disposición final. Los problemas a reparar son: los hoyos que generan las personas al cortar los alambres de la malla, entonces habrá que sustituir ese tramo de malla, enderezar los postes y tramos de malla que pudieran estar tirados o deformados, por que las personas o animales se recargan en estos, y rellenar los hoyos que llegan a hacer los animales en el terreno para pasar por debajo de la malla.

2.5.11 Oficinas generales y áreas de servicio

Su mantenimiento consiste en realizar labores diarias de limpieza general, pintar las fachadas y muros de estos edificios cuando menos una vez al año, y que las instalaciones hidráulicas, eléctricas y sanitarias funcionen correctamente.

2.5.12 Mantenimiento de áreas verdes

Las áreas verdes brindan una buena imagen del acceso y de las oficinas, su mantenimiento consiste en:

- Poda periódica de las especies arbóreas (una vez por año).
- Riego (tres veces a la semana).
- Aplicación de herbicidas y plaguicidas (cada trimestre).
- Poda, limpieza y riego de áreas de jardín (con la frecuencia que se requiera).
- Mantenimiento a la cubierta vegetal que se desarrolle en la superficie de las áreas clausuradas del relleno.

2.5.13 Mantenimiento del sistema de monitoreo

Los sistemas de monitoreo se utilizan para identificar los posibles impactos del relleno sanitario hacia el ambiente.

El mantenimiento en los pozos de monitoreo consiste en utilizar un malacate para evitar que se azolve y con ello se obstruya el flujo de biogas o de lixiviados. También hay que cuidar que no se inunden. Los asentamientos en las celdas son monitoreadas con los postes de referencia. Su mantenimiento consiste en renivelar cuando así lo requiera.

2.5.14 Vigilancia

Para el caso de las instalaciones que tienen interacción con el exterior del relleno sanitario, tales como, el cercado perimetral, la caseta y pluma de acceso, los sistemas de monitoreo de aguas subterráneas, es necesario tener

una vigilancia suficiente, a fin de evitar acciones vandálicas sobre dichas instalaciones. Es recomendable proveer de iluminación las áreas de acceso.

2.5.15 Cobertura final

En algunas ocasiones sobre la capa de sello final del relleno sanitario, se llegan a presentar problemas ocasionados por la lluvia y el viento, por ejemplo: depresiones, grietas o erosiones. Es importante se reparen lo más pronto posible para evitar que los residuos queden al descubierto y provoquen problemas al medio ambiente.

2.6 CONTROL DE CONTAMINANTES

Antes de analizar las prácticas de manejo de los lixiviados y biogas, es importante comprender los principios de la descomposición de los residuos dentro del relleno sanitario.

Todos los residuos sólidos sufren cierto grado de descomposición, pero la fracción orgánica es la que sufre cambios más importantes. Los subproductos de la descomposición están integrados por líquidos, gases y sólidos. La descomposición se lleva a cabo a través de procesos químicos y biológicos.

2.6.1 Reacciones biológica

Son aquellas que conlleva a la generación de gases y eventualmente líquidos. Durante la etapa de descomposición aeróbica (en presencia de oxígeno) se genera principalmente un gas llamado bióxido de carbono. Una vez que el oxígeno se ha consumido, la descomposición se lleva a cabo de manera anaeróbica (ausencia de oxígeno) y en esta etapa la materia orgánica se transforma principalmente en bióxido de carbono, metano y cantidades traza de amoníaco y ácido sulfhídrico.

2.6.2 Reacciones químicas

Son la disolución y suspensión de materiales y productos de conversión biológica en los líquidos que percolan a través de los residuos sólidos, la evaporación y vaporización de compuestos químicos y agua, dentro de la masa envolvente de biogas, la adsorción de compuestos orgánicos volátiles y semi volátiles dentro de los materiales del relleno, la deshalogenación y descomposición de compuestos orgánicos y las reacciones de oxidación - reducción que afectan la disolución de metales y sales metálicas. La disolución de los productos de conversión biológica y otros compuestos, particularmente los compuestos orgánicos, dentro de los lixiviados es un punto muy importante, porque estos materiales pueden ser transportados fuera del relleno sanitario con los lixiviados. Estos compuestos orgánicos pueden ser posteriormente incorporados a la atmósfera a través del suelo o por medio de las instalaciones de tratamiento de lixiviados. Otras reacciones no de menor importancia que las

anteriores son entre ciertos compuestos orgánicos y las capas de arcilla las cuales alteran las propiedades y estructura de la misma.

2.6.3 Reacciones físicas

Son aquellas que están asociadas con la difusión de gases dentro y fuera del relleno, el movimiento de lixiviados en el relleno sanitario y subsuelo y los asentamientos causados por la consolidación y descomposición de los materiales depositados.

En la tabla 2.6 se presenta las diferentes categorías de residuos, los procesos y los subproductos generados.

La velocidad de descomposición va a depender de diferentes factores, así como de sus características físicas, químicas y biológicas de los residuos sólidos, como son:

- Tamaño de partícula.
- Forma de partícula
- Densidad.
- Composición.
- Componentes químicos.
- Número y distribución de microorganismos.
- Oxígeno.
- Humedad
- Temperatura.
- PH.

TABLA 2.6 DESCOMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS.

RESIDUOS	PROCESOS	SUBPRODUCTOS.
Materiales orgánicos (papel, alimentos, trapo, etc.)	Biológico (microorganismos)	Líquidos, gases y sólidos.
Residuos inorgánicos (metales)	Químicos (oxidación)	Compuestos de metales.
Otros residuos	Biológicos y químicos	Según el tipo de residuos.

Hay tres principales efectos por medio de la degradación de los residuos sólidos como son:

- Hundimientos y asentamientos diferenciales.
- Generación y migración de biogas.
- Generación y migración de lixiviados.

2.6.4 Hundimientos y asentamientos diferenciales

Los hundimientos del relleno ocurren lentamente con el tiempo y esto es causado por:

- Peso del relleno (con respecto a la altura).
- Descomposición de los residuos sólidos (disminución del volumen).
- Compactación deficiente.

Los problemas básicos creados por los asentamientos diferenciales incluyen el encharcamiento de agua, incrementando la generación de lixiviados, la producción de biogas y la reducción del crecimiento de especies vegetales. Los asentamientos diferenciales son provocados por:

- Tráfico vehicular.
- Compactación deficiente.
- Depósito de grandes cantidades de residuos orgánicos a lado de residuos orgánicos e inertes (diferentes velocidades de degradación).
- Llenado irregular de las celdas.
- Asentamientos de materiales o el llenado de huecos provocados por la descomposición.

2.6.4.1 Control de asentamientos

Los métodos de control de asentamientos incluyen:

- Buena compactación.
- Separado o recuperación de materiales de los residuos voluminosos.
- Compactación de los residuos voluminosos lo más posible.
- Mantener el área de trabajo liso y uniforme.
- Acondicionamiento de caminos con materiales inertes.
- Nivelación de áreas para favorecer los escurrimientos.
- Llenar las depresiones con material de relleno si estas son evidentes.
- Durante la construcción del sitio, las grandes depresiones pueden ser rellenadas con residuos fácilmente manejable para renivelar.

La identificación de los problemas de asentamiento se hace a través de la observación directa sobre las áreas rellenadas, como son:

- Agrietamiento en la cubierta.
- Depresiones visibles.
- Fracturas profundas.
- Estancamiento de agua.

2.6.5 Lixiviados

Como consecuencia de la descomposición de los residuos sólidos se produce líquidos percolados o lixiviados y gases, que al abandonar el relleno pasan a los alrededores y los afecta de manera nociva. El lixiviado es de aspecto desagradable, tiene mal olor puede contaminar las aguas subterráneas y superficiales. Contiene materia orgánica e inorgánica. (Trejo, 1999)

La legislación requiere que los lixiviados que hayan sido generados, se colectan y traten para su disposición final. Este requerimiento dio como resultado la exigencia de los o más capas de impermeabilización en el fondo del relleno. En este tipo de sistemas también se requieren un sistema de detección de fugas. Como consecuencia de este tipo de diseño se tiene una baja probabilidad de que el lixiviado pueda escapar, pero existe el riesgo. Se han probado capas impermeables con materiales como la arcilla fina o sintéticos como plástico.

Es necesario perforar pozos de monitoreo de aguas subterráneas alrededor del relleno. Los requerimientos básicos son de un pozo aguas arriba del área de relleno y tres aguas abajo. Las muestras colectadas de estos pozos se analizan. Esto se hace para asegurar que el lixiviado no llegue al manto freático.

No hay técnica que eliminen absolutamente la generación de lixiviado y esté no es problema, a menos que migre desde el punto de generación hacia las aguas superficiales o subterráneas. La migración de lixiviados ocurre cuando se satura la capacidad de campo, esta condición se refiere a la capacidad de un material para retener humedad libre en contra de la fuerza de gravedad. El lixiviado puede migrar a la superficie del suelo o hasta el agua subterránea, a lo largo de la vía de menor resistencia dentro del relleno y en el suelo circundante.

La descarga superficial ocurre a lo largo de la base de taludes, en el punto más débil en un sistema de cubierta o donde el suelo tiene mayor permeabilidad. El uso de suelos impermeables como cubiertas diarias o intermedias puede originar escurrimientos a los lados del relleno. Dichos rellenos superficiales pueden producir:

- Olores y condiciones desagradables.
- Contaminación potencial del agua superficial.
- Infiltración del lixiviado al agua subterránea.
- Impacto a la flora del sitio.

Si se presenta un escurrimiento, aparecerá como una descarga oscura de color café rojizo y olor fétido, con burbujas en el escurrimiento. Una vez que la descarga se detiene, el suelo presenta una mancha de color café rojizo.

El control de las descargas superficiales se realiza mediante:

- Control de la generación de lixiviados.
- Excavando zanjas alrededor del escurrimiento y rellenándola con suelo de textura fina y bien compactado para interrumpir el flujo.

La contaminación del agua subterránea se presenta si el lixiviado llega a alguno de estos cuerpos. Un método utilizado, para detectar la migración, es el monitoreo de la humedad del suelo bajo el relleno con lisímetros. Dicho

monitoreo se efectúa principalmente para evaluar la calidad del agua, con respecto a la presencia del lixiviado.

La ubicación adecuada del sitio y la construcción pueden dar seguridad en el control de la migración de lixiviados. La infraestructura necesaria incluye sistemas de impermeabilización empleando materiales de baja permeabilidad (naturales o sintéticos), colocados con cierta pendiente para conducir por gravedad el lixiviado a los tubos colectores. Estos tubos colectan el lixiviado para su posterior extracción y tratamiento. La operación adecuada de dichas instalaciones, la colocación de cobertura final de acuerdo a las especificaciones del proyecto, y el mantenimiento de la cubierta vegetal reducirán migración de lixiviados.

La mayoría de los sistemas convencionales de impermeabilización están diseñados con sistemas de colección y remoción de lixiviados que disminuirán el tirante de los líquidos sobre la superficie impermeable hasta una altura de aproximadamente 15 cm, bajo estas condiciones. Un sistema de impermeabilización cuidadosamente construido que contenga una capa de 30 cm de arcilla colocada y compactada, con una permeabilidad en el sitio de 1×10^{-7} cm/seg., mantendrá una permeación de aproximadamente 150 m³/ha-año, de lixiviado.

En contraste una capa de geomembrana sintética de 40 mil (0.0035 ft) deberá permitir no más de 1 m³/ha-año de permeación cuando el tirante máxima de lixiviado sobre la superficie impermeable sea de 15 cm.

En la tabla 2.7 se muestra las líneas directrices para instalaciones de control de lixiviados.

TABLA 2.7 LÍNEAS DIRECTRICES PARA INSTALACIONES DE CONTROL DE LIXIVIADOS.

ARTÍCULO	COMENTARIO
Recubrimiento sintético de membrana flexible.	Los recubrimientos deben diseñarse y construirse para contener los fluidos, incluyendo a los residuos y lixiviados. Para los rellenos de residuos sólidos municipales, no se requiere recubrimiento sintético. Los recubrimientos sintéticos deben tener un espesor de 40 mm. Estos recubrimientos deben instalarse para cubrir todo los materiales geológicos naturales que estarán en contacto con los residuos y el lixiviado en el relleno.
Selladores de fondo.	No existen normativas específicas que gobiernen la aplicación de los selladores de fondo en los rellenos de residuos sólidos. El diseño, la construcción y la instalación de estos están sujetas a la aprobación de las agencias locales.
Recubrimientos artificiales de arcilla.	Los recubrimientos de arcilla son opcionales para los rellenos. Deben tener un espesor

<p>Recubrimientos artificiales de arcilla.</p>	<p>mínimo de 0.3 m y debe instalarse con una compactación relativa de por lo menos el 90 %. El recubrimiento debe mostrar una permeabilidad máxima de 1×10^{-6} cm/seg. Si se instalan debe cubrir todo los materiales geológicos naturales que estarán en contacto con los residuos y el lixiviado en el relleno.</p>
<p>Barreras subsuperficiales.</p>	<p>Una barrera subsuperficial se usa conjuntamente con los materiales geológicos naturales para asegurar la estandarización de permeabilidad lateral; se utiliza cuando hay un potencial de movimiento lateral de fluidos, incluyendo residuos y lixiviados. Las barreras deben tener un espesor mínimo de 2 ft para materiales arcillosos o un mínimo de 40 mm para los materiales sintéticos. Se requiere que estas estructuras estén localizadas a un mínimo de 5 ft dentro de materiales geológicos naturales que satisfacen los requisitos de permeabilidad de 1×10^{-6} a 1×10^{-7} cm/seg. Si se utilizan muros interceptores, las excavaciones de los rellenos también deben localizarse en materiales geológicos naturales que exhiban permeabilidad no mayores que 1×10^{-6} cm/seg. Se requiere que las barreras tengan sistemas de recolección de fluidos pendiente arriba de la estructura. Los sistemas deben diseñarse, construirse, explotarse y mantenerse para prevenir la carga hidráulica contra la estructura.</p>

Fuente: Tchobanoglous G., Theisen H. Y Eliassen R.

Las fugas son el resultado de imperfecciones en los sistemas de impermeabilización. Las fugas se pueden presentar tanto en los sistemas construidos por arcillas como en los que utilizan materiales sintéticos. La tasa de flujo en las fugas es directamente proporcional a:

- La altura del lixiviado sobre la superficie impermeable.
- El tamaño de la imperfección.
- La permeabilidad de las capas subyacentes al sistema de impermeabilización.

La primera acción para evitar las fugas de lixiviados, consiste en efectuar una instalación bajo una estricta supervisión. Un método alternativo para reducir las fugas es la construcción de una doble capa impermeable.

2.6.5.1 Tratamiento de lixiviados

Un sistema de colección de lixiviados se construye con el fin de utilizarse para desplazar el lixiviado del relleno. El proceso consiste en coleccionar, bombear y conducirlo hacia una planta municipal de tratamiento de aguas residuales o para su manejo en el mismo sitio.

2.6.5.2 Sistema de tratamiento de lixiviados

Hay varias opciones de tratamiento de lixiviados. La selección del proceso de tratamiento depende de la caracterización final del lixiviado. Existen cuatro categorías de tratamiento las cuales son:

- Descarga directa a un cuerpo receptor de aguas.
- Descarga a una planta de tratamiento pública.
- Recirculación al relleno.
- Aplicación o tratamiento sobre el suelo.

2.6.5.3 Recirculación del lixiviado

El tratamiento de lixiviados puede ser complementado por la recirculación de ese lixiviado de regreso al interior de las celdas del relleno. Esta técnica también tiene el beneficio de acelerar la estabilización de los materiales orgánicos presentes. El uso de la recirculación no elimina la necesidad final de tratamiento, el lixiviado en exceso tendrá que ser movido y tratado.

Se puede utilizar tres diferentes sistemas de recirculación de lixiviados:

2.6.5.3.1 Irrigación por aspersión

Se realiza mediante el bombeo periódico del lixiviado a través de las boquillas de aspersión situadas a intervalos de 15 a 30 m de separación a lo largo y ancho del relleno. La ventaja de este sistema es que el lixiviado puede quedar sujeto a tratamiento por aireación durante el proceso de aspersión y vía absorción por el material de cobertura durante su infiltración.

2.6.5.3.2 Flujo superficial

Es una técnica en la que se utilizan trincheras, tubos sobre la superficie del relleno o campos de infiltración para distribuir el lixiviado recirculado. El lixiviado es periódicamente bombeado a los sistemas de distribución y se permite su infiltración al interior del relleno. El tratamiento se da en la superficie mediante medios biológicos, adsorción y absorción.

2.6.5.3.3 Irrigación por inyección

Los lixiviados se distribuyen al interior del relleno mediante pequeños tubos o medios de infiltración, enterrados bajo la cubierta final. Ya que el sistema se instala bajo la superficie, la irrigación no es afectada por las condiciones climatológicas y tiene la ventaja de minimizar los problemas potenciales de olores.

Las desventajas de la recirculación de lixiviados incluyen altos costos de inversión, concentraciones crecientes de metales en el lixiviado, saturación de

la capacidad de campo, lo que puede detener la actividad biológica y la desaprobación legal en muchos casos de este procedimiento.

El tratamiento de lixiviados pueden clasificarse de manera general en dos categorías: biológica y fisicoquímica.

Los factores que requieren atención tanto en el diseño como en la operación son: la dificultad potencial para obtener una caracterización representativa de los lixiviados, la variación de la calidad de los lixiviados con respecto al tiempo y la falta de datos basados en casos de tratamiento de lixiviados anteriormente implementados.

2.6.6 Biogas

El biogas se produce de la degradación de los materiales orgánicos. Los dos principales gases formados son metano (CH_4) y bióxido de carbono (CO_2). El metano es del grupo de los alcanos, una mezcla del 5 al 15 % de metano en aire puede causar una explosión si existe una fuente de ignición. (SEDESOL, 1996).

El biogas se puede desplazar por el subsuelo e inclusive fuera del relleno. Si el gas se acumula dentro o bajo estructuras tales como edificios, drenajes u otros sistemas de conducción, puede ocasionar explosiones; es por ello que se construyen pozos de monitoreo en perímetro del sitio, con el fin de evaluar la cantidad de biogas que puede acumularse en dichas zonas no controladas.

La tasa de producción de biogas es gobernada por la velocidad a la que los residuos se descomponen, así como factores ambientales. Cuando la descomposición cesa, la producción de gas también se termina. La producción de gas comienza casi inmediatamente después de que los residuos sólidos son confinados en el relleno.

En la tabla 2.8 se muestra las características de los componentes del biogas.

El movimiento del biogas dentro de los estratos del relleno depende de la siguiente información:

- Espesor de los estratos, y edad de los residuos.
- Composición física de los residuos sólidos depositados.
- Permeabilidad del terreno y del material de cobertura.
- Características y clasificación del suelo adyacente al relleno.

Porcentaje de compactación de los residuos y del material de cubierta.

La emigración del biogas hacia zonas no controladas puede detectarse de la siguiente forma:

- Percibiendo su olor característico.
- Revisando fracturas o grietas de la cobertura mediante un explosímetro.

- Observando incendios o desprendimientos de vapores entre las celdas así como en zonas circundantes.
- Haciendo un muestreo en sitios donde se sospeche que hay migración de biogas.

TABLA 2.8 COMPONENTES DE BIOGAS.

COMPONENTES	% DEL COMPONENTE (VOLUMEN, BASE SECA).
Metano	47.5
Bióxido de carbono	47.5
Nitrógeno	3.7
Oxígeno	0.8
Hidrocarburos parafínicos	0.1
Hidrocarburos aromáticos y cíclicos	0.2
Hidrogeno	0.1
Ácido sulfhídrico	0.01
Monóxido de carbono	0.1
Compuestos trazas	0.5
Capacidad calorífica	300 - 550
Gravedad específica	1.04
Contenido de humedad	Saturado
Temperatura (en la fuente)	41°C

Fuente: Secretaria de Desarrollo Social (SEDESOL)

Con respecto al muestreo se tiene las siguientes recomendaciones:

La profundidad del muestreo varía dependiendo de la geología y la distancia al relleno. Las pruebas iniciales se realizan normalmente entre 30 y 45 cm bajo la superficie del suelo debido a la capacidad limitada del equipo de prueba. Las pruebas se deben realizar principalmente, en el perímetro de zonas habitacionales.

También se colocan pozos de monitoreo de biogas, las cuales son estructuras que se construyen principalmente en las zonas circundantes al sitio, con el fin de evaluar y detectar el biogas acumulado en tres estratos del suelo.

Se utilizan explosímetros para detectar la presencia de metano y se utilizan para varios propósitos como:

- Medición del porcentaje de gas al límite explosivo inferior.
- Medición de la concentración total de gas como un porcentaje referido a gases totales.

El biogas también afecta a la atmósfera la cual contienen menos del 1% de compuestos orgánicos no metánicos. Así la migración del biogas propicia un

mecanismo de transporte para los compuestos orgánicos no metánicos contenidos en los residuos del relleno.

Se puede utilizar varios tipos de sistemas para controlar las emisiones y la migración del biogas (sistemas activos y pasivos), dependiendo de la cantidad que se genere. Dicho control consiste en:

- Venteo a la atmósfera.
- Combustión en pebeteros o quemadores.
- Incineración.
- Recuperación como fuente alterna de energía.

Los sistemas que pueden utilizarse son:

2.6.6.1 Sistemas de Control Activo

Son pozos construidos a diferentes profundidades, equipados con un ducto y equipo mecánico, como sopladores y bombas de extracción. Estos sistemas incluyen:

- Pozos de extracción y trinchera (captación).
- Pozos de inyección de aire o trincheras (barreras).

El sistema perimetral de pozos de extracción de biogas puede ser de extracción natural y consisten en una serie de pozos verticales instalados en el perímetro del sitio.

El sistema perimetral de trincheras de extracción consiste en una línea de zanjas interceptoras equipadas con grava y tubo de P.V.C perforados o ranurados.

El sistema perimetral de pozos de inyección de aire consiste en una serie de pozos verticales instalados en el suelo natural, entre el límite de los residuos depositados de amortiguamiento requerido.

El sistema trinchera perimetral de inyección de aire consiste en una línea de zanjas interceptoras equipadas con grava y tubo de P.V.C perforados o ranurados.

2.6.6.2 Sistemas Pasivos de Control

Los sistemas son:

- Sistemas de trinchera de venteo (barrera).
- Quemadores y venteos (captación).

Sistema de trincheras de venteo. Consiste en una trinchera interceptora rellena de grava que contiene un tubo horizontal perforado o ranurado. El tubo se

conecta a conductos verticales que permiten la acumulación del biogas para ventearlo a la atmósfera.

Quemadores y venteos son instalaciones sencillas de tubo colocado dentro del estrato de residuos sólidos para permitir el venteo del biogas a la atmósfera. Un sistema de quemadores pasivos es muy similar a un sistema de venteo, excepto que el gas se quema y es necesaria cierta infraestructura adicional para mantener la combustión.

La recuperación y uso de biogas producidos por rellenos sanitarios pueden ser las siguientes:

- Combustible para uso industrial.
- Combustible para generación de electricidad.
- Combustible para uso doméstico.
- Combustible para vehículos
- Producción de metanol.

En todos los casos se requiere cierto grado de procesamiento antes de poder utilizar el biogas. Las concentraciones del biogas fluctúan entre el 50 y 55 % para el metano y 45 y 50 % para el dióxido de carbono, lo cual equivale a un valor energético del biogas entre 4.5 y 5.0 Kcal/m³. Pueden ser utilizado directamente en calderas, calefactores, máquinas de combustión interna. El biogas puede tratarse para remover las impurezas y mejorarlo hasta obtener 9 Kcal/m³. Este gas es gas de calidad para gasoductos y puede ser inyectado a los sistemas de distribución existente, convertirse en fertilizantes o licuarse.

2.6.7 Monitoreo ambiental del relleno sanitario

Un monitoreo ambiental de un relleno sanitario, debe ser un instrumento de vigilancia de las condiciones que pueden afectar a la salud pública y al ambiente.

Se realiza monitoreos para: aguas subterráneas, lixiviados y biogas.

El monitoreo de aguas subterráneas como se muestra en las figuras 2.11 y 2.12 en los rellenos tiene la finalidad de detectar la contaminación inaceptable del agua subterránea que resulta de la operación de los rellenos. Se recomienda un arreglo mínimo de cuatro pozos.

Por otro lado, el monitoreo de lixiviados sirve para establecer la presencia de tendencias o irregularidades en dicho contaminante y proporcionar un estándar contra el cual se pueda comparar las irregularidades detectadas con respecto a las mediciones del agua subterránea. Para el monitoreo de lixiviados se recomienda construir pozos como se muestran en la figura 2.13.

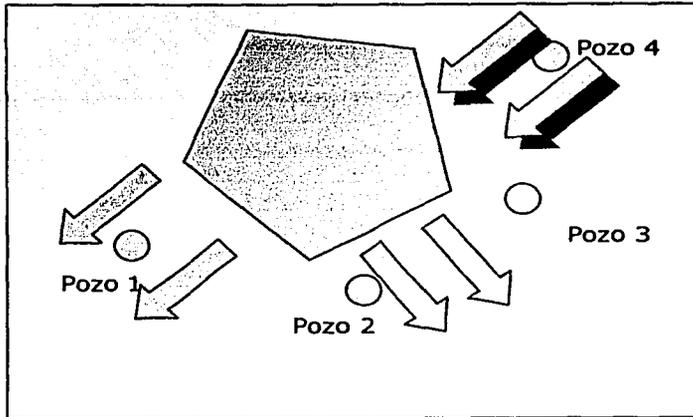


Fig. 2.11 Arreglo de pozos para monitoreo de aguas subterráneas.

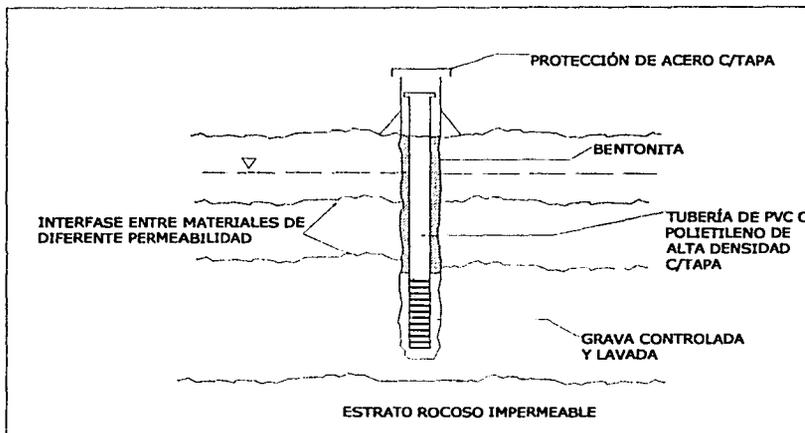


Fig. 2.12 Esquema de pozos para monitoreo de aguas subterráneas.

El monitoreo del gas de los rellenos (GR) o Biogas tiene la intención de detectar sus emisiones inaceptables, resultantes de las operaciones del relleno. El metano (CH_4) y el dióxido de carbono (CO_2) son los mayores constituyentes del gas, también contienen otros gases que incluyen compuestos orgánicos no metánicos (CODM's), ácido sulfhídrico (H_2S), nitrógeno (N_2), hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2). Para el monitoreo del biogas se recomienda construir pozos como a continuación aparecen en la figura 2.14.

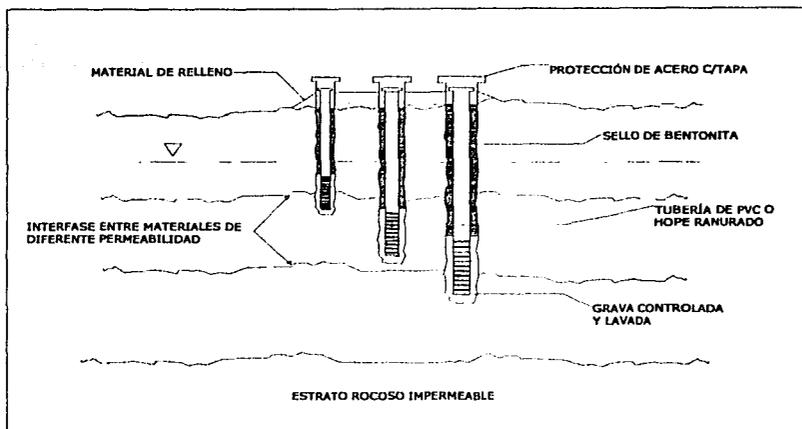


Fig. 2.13 Batería de pozos para monitoreo de lixiviados.

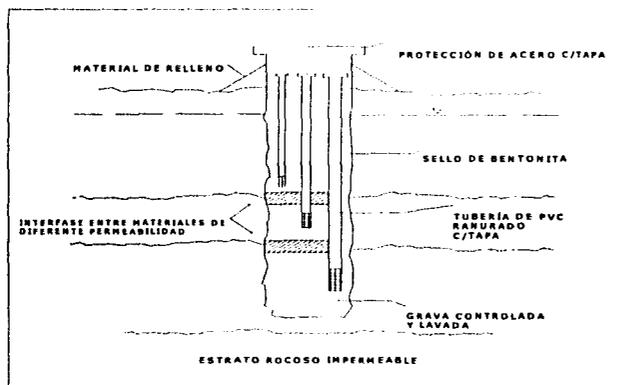


Fig. 2.14 Batería de pozos para monitoreo de biogas.

Todos los sitios de disposición final deben ser monitoreados, para detectar la presencia de biogas y determinar si este se encuentra en concentraciones que signifiquen un riesgo inaceptable para la salud humana y el ambiente.

Una forma de darse cuenta si afecta estos contaminante es por medio de los siguientes efectos en el ambiente.

La alteración física de las plantas tales como decoloración, muerte parcial o anomalías en el crecimiento, puede indicar que el lixiviado o el biogas están actuando sobre ellos, ya que los componentes pueden afectarlos.

El análisis de suelo puede ser utilizado para detectar los componentes del lixiviado, particularmente aquellos propensos al intercambio catiónico u otras reacciones de adsorción que no pueden obtenerse de muestras de agua.

Existen dos tipos de monitoreo que son el periódico y el continuo. El primero se realiza bajo un programa de mediciones en cierto intervalo de tiempo, mientras que el segundo, la medición es continua.

2.6.8 Parámetros

Los programas de monitoreo debe incluir como mínimo y dependiendo del relleno, evaluaciones frecuentes de aguas subterráneas, aguas superficiales, lixiviados, biogas y calidad del aire. Según la naturaleza de la instalación y conforme a las particularidades de cada caso, así como los requerimientos legales correspondientes. Otros aspectos, tales como suelo y vegetación o fauna nociva, deben incluirse en el monitoreo cuando se evalúa un riesgo.

Los parámetros de rutina que deben monitorear para el agua subterránea incluyen pH, potencial redox (Eh), oxígeno disuelto (OD), conductividad específica, metales, nitrógeno amoniacal, cloruros y demanda química de oxígeno (DQO). Para el monitoreo de metales se recomienda evaluar los siguientes: arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo, cobalto, cobre, plomo, níquel, selenio, plata, talio, vanadio y zinc. Es también conveniente medir dirección y velocidad de flujo, así como niveles hidráulicos.

Los parámetros para el lixiviado deben estar basados en una evaluación de la calidad de los cuerpos de agua circundantes, tanto superficiales como subterráneos. A continuación se presenta una lista de parámetros recomendados para el monitoreo de estos como se muestra en la tabla 2.9.

Para el caso de biogas, se muestran en la tabla 2.10 los parámetros indicadores para monitoreo de éstas.

El monitoreo de suelos, tiene la finalidad básica de recabar información, con fines de toma de decisiones para el establecimiento de medidas correctivas en suelos contaminados y en estos casos puede ser utilizado para detectar los componentes del lixiviado.

La frecuencia del muestreo dependerá de la velocidad de movimiento de los contaminantes. La frecuencia mínima para los lixiviados es igual que para aguas superficiales de seis a ocho veces por año o bien conforme a las necesidades del sitio. El monitoreo de biogas debe realizarse en programas mensuales.

TABLA 2.9 PARÁMETROS INDICADORES PARA MONITOREO DE LIXIVIADOS.

PARÁMETRO	INTERVALO (mg/l)
PH	5.3 - 8.5
DQO	3000 - 45000
Cloruros	100 - 3000
Nitritos	5 - 40
Nitrógeno amoniacal	10 - 800
Conductancia específica	-----
Temperatura	-----
Nivel de elevación	-----
Sulfatos	100 - 1500
Cianuros	< 0.10

Fuente: Secretaria de Desarrollo Social (SEDESOL)

TABLA 2.10 PARÁMETROS INDICADORES PARA MONITOREO DE BIOGAS.

PROPÓSITO DEL MONITOREO	EVALUACIÓN DE RIESGO O IMPACTO	EVALUACIÓN DE CONDICIONES DE FONDO	RUTINA	APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA.
PARÁMETROS RECOMENDADOS	Presión del gas en los pozos	Metano (CH ₄)	Presión del gas en los pozos	Metano (CH ₄)
	Temperatura ambiente	Dióxido de carbono (CO ₂)	Temperatura ambiente	Dióxido de carbono (CO ₂)
	Presión barométrica	Oxígeno (O ₂)	Presión barométrica	Oxígeno (O ₂)
	Precipitación pluvial durante el muestreo	Ácido sulfhídrico (H ₂ S)	Precipitación pluvial durante el muestreo	Ácido sulfhídrico (H ₂ S)
	Metano (CH ₄) y Ácido sulfhídrico (H ₂ S)	Nitrógeno (N ₂)		Presión del gas en los pozos y en línea
	Dióxido de carbono (CO ₂)	Hidrógeno (H ₂)		Flujo de gas
	Compuestos orgánicos no - metánicos.	Compuestos orgánicos no - metánicos.		Humedad.

Fuente: Secretaria de Desarrollo Social (SEDESOL)



CAPÍTULO III
CONTAMINACIÓN
DE SUELOS POR
LIXIVIADOS

La contaminación de suelos es un fenómeno de mayor duración y con grandes consecuencias para el aire y el agua, sin embargo, un suelo contaminado es, en general, el producto de procesos graduales, largos en el tiempo. La contaminación del suelo por lixiviados se debe a la filtración de éstos en los sitios de disposición final en donde aun con todos los procesos que se tienen para su control en el caso de rellenos sanitarios, se pueden filtrar por debajo del relleno ocasionando que se contaminen las aguas subterráneas. Este fenómeno puede ocurrir en el mayor de los casos de los tiraderos a cielo abierto, donde no existen prácticamente medidas de control. El proceso de contaminación del suelo por lixiviados, se describe con mayor detalle en el punto 3.2. Con el objeto de comprender mejor estos procesos de contaminación del suelo, enseguida se presenta una descripción general de lo que es el suelo, sus características físicas y químicas así como la clasificación técnica de los mismos.

3.1 COMPOSICIÓN DE LOS SUELOS

El suelo es definido como un agregado no cementado de partículas de mineral y materia orgánica en descomposición (partículas sólidas) junto con el líquido y/o gas que ocupan los espacios vacíos entre las partículas sólidas. También al suelo se le define como el material formado por partículas minerales (producto de la descomposición y/o desintegración de rocas) y vacíos (que puede o no estar ocupados por agua)(Legorreta, 1998).

La formación del suelo es un proceso extremadamente lento, el cual se inicia por la desintegración física de las rocas subyacentes, formando pequeños fragmentos. Estos a su vez sufren un posterior ataque químico y biológico mediante el cual se liberan nutrientes que sirve para el crecimiento de plantas. Al conjunto de estos procesos se les denomina meteorización que son efectos externos que alteran las rocas superficiales. Los residuos originados por el ciclo vital de las plantas se incorporan en el suelo, constituyendo su soporte orgánico. Se puede dividir la composición química de los suelos en orgánicos e inorgánicos. Representando el 50% del total las partículas minerales, de las cuales dominan la arena, arcilla y caliza, y en menor medida óxidos e hidróxidos de hierro y sales; el 5% de origen orgánico; el 45 % restante lo ocupan aire y agua, los cuales aprovechan la porosidad de la arena para penetrar en los suelos y permitir la iteración con los demás elementos. (Doménech, 1993)

3.1.1 Características del suelo

Los suelos tienen variaciones extremas. La cobertura vegetal en la tierra difiere debido a varios factores como son:

- Clima; temperatura y precipitación.
- Propiedades del suelo, como acidez, profundidad del suelo, capacidad del suelo de retención de agua, y toxicidad del suelo.

En la medida en que la superficie de la tierra ha sido expuesta a las fuerzas naturales desde hace miles de años, han ocurrido muchos cambios. El agua y las altas temperaturas rápidamente disuelven, desintegran y cambian las rocas. Las rocas sólidas son desgastadas y cambiadas en materiales del suelo.

Las partículas finas en las capas superficiales del suelo son transportadas hacia abajo por el agua y alojadas o depositadas en capas más profundas. El material orgánico se acumula en su mayor parte en las capas superficiales del suelo. Las diferentes capas que se forman en el suelo, son denominadas horizontes. La exposición vertical del suelo con esta variedad de capas es conocida como perfil del suelo.

La corteza terrestre es atacada principalmente por el aire y las aguas, siendo los medios de acción de estas sustancias sumamente variados. Todos los mecanismos de ataque pueden incluirse en dos grupos: desintegración mecánica y descomposición química.

El término desintegración mecánica se refiere a la intemperización de las rocas por agentes físicos, tales cambios periódicos de temperatura, acción de la congelación del agua en las juntas y grietas de las rocas, efectos de organismos, plantas, etc. Por estos fenómenos las rocas llegan a formar arenas o, cuando mucho limos y sólo en casos especiales arcillas.

Por descomposición química se entiende la acción de agentes que atacan las rocas modificando su constitución mineralógica o química. El principal agente es el agua y los mecanismos de ataque más importantes son la oxidación, la hidratación y la carbonatación.

El suelo es por lo tanto, la capa superficial de la corteza terrestre a la cual se incorporan los organismos y sus productos de desecho; contaminarlos implica acumular en él materia susceptible de alterar sus características naturales, así como de las aguas superficiales, de la vegetación y del agua subterránea.

3.1.2 Propiedades químicas del suelo

Dentro de las propiedades químicas del suelo, se encuentran el pH, la conductividad eléctrica y los nutrientes para las plantas. Enseguida se describen estos parámetros con el fin de explicar su función en la aportación de nutrientes, la conservación de la calidad del suelo y el mejoramiento de las condiciones físicas del mismo.

3.1.2.1 pH

Los suelos se vuelven ácidos, viniendo de materiales alcalinos, por la lixiviación del agua de lluvia de cationes básicos (Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , Na^+) y el remplazo de muchos de ellos por H^+ del ácido carbónico (H_2CO_3) formado de carbonatos disueltos o de dióxidos de carbono e incluso por cationes hidroxilo disueltos de aluminio.

Los suelos no lixiviados o altos en calcio (con áreas de baja precipitación) tienen valores de pH de 8.5. Con el incremento de sodio intercambiable, los suelos pueden alcanzar valores superiores a 10.

3.1.2.2 Conductividad eléctrica

La medida de la conductividad eléctrica de los extractos obtenidos de suelo o de las aguas naturales, permite establecer una estimación aproximadamente cuantitativa de la cantidad de sales que contienen.

La extracción del suelo con el contenido natural de humedad es la que da la medida más exacta de la cantidad de sales solubles en el suelo. El porcentaje de la saturación correspondiente a la humedad del suelo, se encuentra relacionado con las constantes de humedad del mismo y el contenido de humedad correspondiente al suelo en el campo proporciona una escala de salinidad del suelo simple, basada en la conductividad eléctrica obtenida para los extractos de esta dilución o contenido de humedad.

3.1.2.3 Nutrientes

El suelo es la fuente de 13 de los 16 nutrientes esenciales. La concentración en el suelo de estos nutrientes y las condiciones que hacen que sean viables a las plantas, son fundamentales para su crecimiento.

Los nutrientes comunes en el suelo se muestran en la tabla 3.1.

TABLA 3.1 NUTRIENTES COMUNES.

Carbón.	Hidrógeno.	Oxígeno.	Potasio.
Fósforo.	Nitrógeno.	Boro.	Calcio.
Hierro.	Magnesio.	Azufre.	Manganeso.
Cobre.	Zinc.	Molibdeno.	Cloro.

3.1.3 Propiedades físicas del suelo

Las propiedades físicas determinan la viabilidad de oxígeno en suelos y la movilidad del agua en o a través del mismo. Las propiedades físicas del suelo son: textura, estructura, densidad, porosidad, consistencia y color.

3.1.3.1 Textura

La textura del suelo responde a la proporción en que están distribuidas las partículas que lo componen, la capacidad de permeabilizante de un suelo o de

retención del agua es función directa de la textura, este tema se detalla en el punto 3.1.5

3.1.3.2 Estructura

La estructura del suelo es la combinación de partículas primarias (arena, limo, arcilla) dentro de grandes unidades; son de características diferentes según sean los componentes agregadas al mantillo, y basándose en esas características se les denominan: granulares, grumosas, escamosas, laminares, poliédricas, prismáticas o columnares.

3.1.3.3 Densidad

Una medida de la compactación o desprendimiento del suelo es la densidad de masa (kg/m^3). La densidad de partículas solamente mide la densidad de éstas. Un promedio de densidad de partícula es de 2.65 g/cm^3 . El promedio de densidad de masa es de 1.3 g/cm^3 .

3.1.3.4 Porosidad

El espacio del poro, o el área abierta en el suelo, es necesario para los requerimientos adecuados de oxígeno para las raíces y los organismos que descomponen los materiales orgánicos, así como para la infiltración del agua.

3.1.3.5 Consistencia

La consistencia describe la resistencia a la fragmentación. Este valor resulta importante para predecir ciertos problemas de cultivo, así como la adaptación a problemas en la construcción de edificaciones.

3.1.3.6 Color

El color del suelo es una propiedad que se mide fácilmente; es de utilidad para la distinción de límites de diferentes suelos, en mediciones internas como condiciones de humedad, y para la estimación de contenido de materia orgánica y contenido excesivo de sales.

En un suelo se distinguen tres fases constituyentes; la sólida, la líquida y la gaseosa. La fase sólida está formada por las partículas minerales del suelo (incluyendo la capa sólida adsorbida); la líquida por el agua (libre, específicamente), aunque en los suelos pueden existir otros líquidos de menor significación; la fase gaseosa comprende sobre todo el aire, si bien pueden estar presentes otros gases (vapores sulfurosos, anhídrido carbónico, etc.).

3.1.4 Propiedades edafológicas

Los suelos son estructuras dinámicas que van cambiando desde sus inicios hasta adquirir un equilibrio con el entorno, aunque en el proceso de formación

pueden llegar a ser destruidos por la erosión. Los factores que intervienen para la formación y desarrollo de los suelos son: el clima, el relieve, la actividad biológica, la composición litológica y el tiempo de actuación de todos ellos.

La materia orgánica es proporcionada por los animales y vegetales colonizadores del sustrato inorgánico; el clima determina el volumen de precipitación y la temperatura a la que tiene lugar las alteraciones químicas necesarias. El relieve facilita o dificulta según el grado de inclinación de la superficie, la infiltración del agua en el terreno, también determina el grado de erosión y la orientación con respecto al sol.

El resultado final tras el proceso continuo de transformación química o bioquímica de los residuos y sustancias vegetales y animales, es la formación del mantillo o humus. Contiene sustancias diversas (humina, ácido húmico, etc.) y proporciona al suelo los elementos nitrogenados indispensables para su fertilidad. El humus puede considerarse la base de la fertilidad del suelo, ejerce una influencia favorable sobre su estructura, y actúa como regulador de la nutrición, reteniendo y haciendo asimilable el fósforo y la potasa, y favoreciendo la actividad biológica del suelo.

Los horizontes de la estructura existente entre la superficie y la roca madre puede tener composiciones tipo A, B o C, y éstas a su vez se dividen en subhorizontes.

- **Horizonte A:** Constituye la capa superior del suelo, hasta una profundidad de unos pocos centímetros. Contiene la mayor parte de la materia orgánica del suelo y es donde tiene lugar la máxima actividad biológica.
- **Subhorizonte A00:** Esta formado por el resto de hojas, ramas y hierbas provenientes de la capa más superficial del suelo.
- **Subhorizonte A0:** Es la capa que se encuentra inmediatamente debajo de la A00, suelen apreciarse los micelios de los hongos (hebras finas y blanquecinas). El humus comienza aquí su formación activa.
- **Subhorizonte A1:** Es básicamente inorgánica. Sus componentes minerales arcillosos están muy ligados al humus, lo que le confiere un tono pardusco.
- **Subhorizonte A2:** Lo forma el arrastre de las arcillas, óxido de hierro y materia orgánica humificada, confiriéndoles una tonalidad más clara que la capa anterior. Finalmente queda depositado en horizonte B.
- **Horizonte B:** Es denominado subsuelo; en él se acumulan las arcillas provenientes del arrastre del horizonte superior. Los compuestos férricos y coloides húmicos les confiere tonalidades rojizas y parduscas. En esta capa, dependiendo de la zona, se forman corazas lateríticas (regiones de clima tropical) o laminados calcáreos (regiones áridas).
- **Horizonte C:** Corresponde a la roca madre. Esta capa puede denominarse en ocasiones D o R, dependiendo de si ha comenzado a sufrir o no el proceso de meteorización. Normalmente en la parte

superior presenta diversos estados de alteración física de los elementos mezclados.

Las características de los suelos varían de un lugar a otro, ya que sus propiedades son diferentes cuando se encuentran en climas tropicales, en comparación con las que se presentan en climas templados o fríos. El suelo se clasifica de acuerdo al sistema de clasificación FAO - UNESCO, los suelos en México se clasifican por unidades y subunidades.

3.1.4.1 Clasificación por unidades

Las clases están definidas en función de los factores formadores del suelo, el grado de desarrollo del perfil y las características morfológicas mayores. Los suelos se dividen en:

- **Suelos indiferenciados (azonales):** Litosol y Haplosol; definido en función del desarrollo nulo o casi nulo del perfil.
- **Suelos condicionados por el material parental (intrazonales):** Histosol, Rendzina, Ranker, Andosol y Vertisol; suelos de poco desarrollo, cuyas características diagnosticas son aquellas heredadas de su material parental.
- **Suelos de desarrollo incipiente o bien no condicionados, fundamentalmente al clima (intrazonales):** Arenosol, Solonetz, Planosol, Cambisol, Molisol y Argimolisol; suelos de desarrollo moderado o mayor, cuyas características definitivas son aquellas que indican la actuación incipiente de los procesos formadores, o bien, las que indican procesos particulares que ocurren con cierta independencia de los procesos típicos de las diferentes zonas climáticas.
- **Suelos de climas secos y semisecos (zonales):** Solonchak, Argixerol y Xerosol; se definen en función del clima, el cual retarda el desarrollo del perfil.
- **Suelos de clima estepario- templados y semisecos-(zonales):** Argimolisol y Molisol.
- **Suelos de climas húmedos(zonales):** Argilizados (Acrisol), muy intemperizados (Ferrisol).

Geológicamente hablando, los suelos pueden ser:

Azonales: Aquellos que presentan un contraste acusado en relación con los suelos zonales que les rodean. Carecen de horizontes definidos en general muy poco evolucionados.

Intrazonal: Los que, pesar de la influencia climática, ofrecen particularidades notables debidas a la naturaleza de la roca madre (ej. Los suelos calcimórficos, formados a partir de rocas calcáreas, como la sendzina), a la presencia de abundantes sales (suelos halomórficos, como el solonetz), a la inundación periódica, más o menos intensa (suelos hidromórficos, como el gley

desarrollado en condiciones de poco drenaje y que se presenta moteado por diversas coloraciones).

Zonales: Aquellas cuya características actuales son el resultado de una prolongada influencia climática.

3.1.4.1.1 Clasificación por subunidades

Las clases están definidas en función de la homogeneidad genética, horizontes y características diagnósticas, que evidencia la actuación de procesos pedogénicos que pueden o no ocurrir dentro de un rango restringido, en el grado de desarrollo del suelo. A continuación se presentan los tipos de horizonte que se consideran diagnósticos. (Pemex, 1988)

- **Por el tipo de horizonte A.**

Altamente humificados: Mólico y Úbrico
Con fuerte eluviación: Alhico.

- **Por el tipo de horizonte B.**

Incipiente : Cámbico.
Argilizados: Llúvico.
Con Hierro /Aluminio: Férrico y Plácico.
Con materia orgánica: Húmico.
Muy intemperizado: Acrico.

Las características que definen a estos dos incisos son la presencia de horizontes diagnósticos que indican la predominancia de ciertos procesos sobre otros, la intensidad de los mismos, y en el caso de los horizontes B, el tipo de material que ha migrado y su grado de intemperismo. (Pemex, 1988)

- **Por el tipo de características diagnósticas.**

Hidromorfismo dominante: Gleyco.
Con acumulación: Cálxico y Gypsico.
Ferralizados: Pléntico.

- **Horizontes sin desarrollo.**

De origen aluvial: Flúvico.
Residuales: Eólico y Régico.

- **Ausencia de otros horizontes excepto las características de la unidad.**

En suelos maduros: Artico.
En suelos desarrollados: Háplico.

Dentro de las unidades y subunidades no se incluye a los suelos transicionales, es decir aquellos que además de presentar las propiedades diagnósticas de la clase a que pertenece, tienen características subordinadas que son típicas de otros suelos o de materiales distintos al suelo (Pemex, 1988).

3.1.4.1.2 Clasificación por grupos

Se han dividido las subunidades en grupos, se pueden agrupar las clases de estas categorías en 3 grupos:

- **Características no transicionales:**

Por el color: Crómico y Pélico.

Por la temperatura: Gélico.

Por la saturación de bases o pH: Dístrico, Eútrico.

Por la presencia de compuestos: Tiónico, Calcárico, Solódico.

Por la acumulación secundaria de materia orgánica: Húmico

Por el grado de desarrollo: Paleosólico.

Por la formación de costras superficiales: Takyrico.

- **Características transicionales:**

Hacia suelos feralíticos: Terrálico, Ródico.

Hacia Podsol: Glósico (Ferrálico)

Hacia Vertisol: Vértico.

Hacia suelo hidromórfico: Acuilco.

Hacia "no suelo": Régico.

- **Características de la subunidad: únicamente típico.**

Para algunos de los grupos se tienen las siguientes definiciones:

- 1) **Gélico:** Suelo en el que se presenta congelación permanente dentro de los 100 cm superficiales.
- 2) **Ródico:** Suelo de color rojo. Más rojo que 7.5 yr y con chroma en húmedo, mayor de 3.5 (tabla de colores de Munsell). En suelos que presentan horizonte.
- 3) **Crómico:** Suelo con horizonte B con chroma mayor de 4 dominante (tabla de colores de Munsell).
- 4) **Pélico:** suelo que en los 30 cm superficiales es de color negro o gris con chroma en húmedo de 0.5 o menor (tabla de colores de Munsell).
- 5) **Dístrico:** Suelo con menor de 50% de saturación con bases (por el método del acetato de amonio a pH 7), al menos entre los 20 y 50 cm de profundidad en suelos orgánicos se refiere a un pH (1:1 en agua) de 5.5 dominante.
- 6) **Eútrico:** Suelo con 50% a mayor saturación con bases, al menos entre los 20 y 50 cm de profundidad. En suelos orgánicos se refiere a un pH de 5.5 dominante.

- 7) **Tiónico**: Suelo con acumulación excesiva de azufre que se traduce en un pH menor de 3.5.
- 8) **Calcárico**: Suelo con reacción moderada o más fuerte al HCl, al menos entre los 10 y 50 cm de profundidad.
- 9) **Sódico**: suelo cuyo horizonte B presenta en alguna parte una saturación con sodio intercambiable mayor del 6%(por el método de acetato de amonio a pH 7).
- 10) **Ferrálico**: Suelo en alguna parte del horizonte B tiene capacidad de intercambio catiónico total de menos de 24 meq/100g de arcilla %(por el método de acetato de amonio a pH 7), con nódulos de diámetro menor a 2 cm separados de la matriz del suelo, cuyo exterior esta débilmente cementado o endurecido con hierro y es más rojo y más oscuro que el interior.
- 11) **Húmico**: Suelo cuyo horizonte B argélico tiene una distribución de arcilla, que no decrece más del 20 % con respecto a su máximo, hasta una profundidad de 150 cm.
- 12) **Acuico**: Suelo con evidencias de hidromorfismo como resultado de la saturación estacional con agua; éste se manifiesta con policromía y nódulos o manchas de hierro y manganeso.
- 13) **Vértico**: Suelo que en alguna parte del perfil tiene 30 % o más arcilla y grietas de 1 cm o más de ancho, en el transcurso del año, a menos que estén sometidos a riego. Presenta además una o más de las siguientes características: Facetas de Fricción - presión y agregados estructurales en forma de cuña.
- 14) **Hísticos**: suelo que presentan horizontes Hísticos.
- 15) **Régico**: Suelos que no presentan horizonte B, por definición, pueden presentar horizonte B Cámbico.
- 16) **Glósico**: Suelo que presenta un horizonte A Alhico con profundas penetraciones lingüiformes hacia el horizonte B subyacente.

Los suelos **Hidromórficos** tienen la cualidad de un exceso de humedad y un drenaje pobre. (Pemex, 1988)

Los suelos **Halomórficos**, son suelos bajo condiciones de drenaje imperfecto en regiones áridas; se caracterizan por concentraciones anormales de sales en sus horizontes superiores. Se denominan suelos **Alcalinos**. (Pemex, 1988)

Los suelos **Salinos** son el resultado de acumulaciones de sales solubles de sodio, calcio, magnesio y potasio en los horizontes superiores. A este proceso se le llama salinización. Los aniones hallados son fundamentalmente, el clorión y el sulfatión con algo de carbonato y bicarbonato y los iones intercambiables son el calcio y el magnesio. La superficie de un suelo salino está casi siempre cubierta por una costra blanca de sales. Éstas suben por capilaridad y permanecen cuando se ha evaporado, a estos suelos se les llama Alcalinos blancos. Son moderadamente alcalinos, cuando su pH se encuentra alrededor de 8 debido a que, las concentraciones de sodio intercambiable se encuentran en cantidades relativamente bajas. (Pemex, 1988)

- 7) **Tiónico**: Suelo con acumulación excesiva de azufre que se traduce en un pH menor de 3.5.
- 8) **Calcárico**: Suelo con reacción moderada o más fuerte al HCl, al menos entre los 10 y 50 cm de profundidad.
- 9) **Sódico**: suelo cuyo horizonte B presenta en alguna parte una saturación con sodio intercambiable mayor del 6%(por el método de acetato de amonio a pH 7).
- 10) **Ferrálico**: Suelo en alguna parte del horizonte B tiene capacidad de intercambio catiónico total de menos de 24 meq/100g de arcilla %(por el método de acetato de amonio a pH 7), con nódulos de diámetro menor a 2 cm separados de la matriz del suelo, cuyo exterior esta débilmente cementado o endurecido con hierro y es más rojo y más oscuro que el interior.
- 11) **Húmico**: Suelo cuyo horizonte B argílico tiene una distribución de arcilla, que no decrece más del 20 % con respecto a su máximo, hasta una profundidad de 150 cm.
- 12) **Acuico**: Suelo con evidencias de hidromorfismo como resultado de la saturación estacional con agua; éste se manifiesta con policromía y nódulos o manchas de hierro y manganeso.
- 13) **Vértico**: Suelo que en alguna parte del perfil tiene 30 % o más arcilla y grietas de 1 cm o más de ancho, en el transcurso del año, a menos que estén sometidos a riego. Presenta además una o más de las siguientes características: Facetas de Fricción – presión y agregados estructurales en forma de cuña.
- 14) **Hísticos**: suelo que presentan horizontes Hísticos.
- 15) **Régico**: Suelos que no presentan horizonte B, por definición, pueden presentar horizonte B Cámbico.
- 16) **Glósico**: Suelo que presenta un horizonte A Alhico con profundas penetraciones lingüiformes hacia el horizonte B subyacente.

Los suelos **Hidromórficos** tienen la cualidad de un exceso de humedad y un drenaje pobre. (Pemex, 1988)

Los suelos **Halomórficos**, son suelos bajo condiciones de drenaje imperfecto en regiones áridas; se caracterizan por concentraciones anormales de sales en sus horizontes superiores. Se denominan suelos **Alcalinos**. (Pemex, 1988)

Los suelos **Salinos** son el resultado de acumulaciones de sales solubles de sodio, calcio, magnesio y potasio en los horizontes superiores. A este proceso se le llama salinización. Los aniones hallados son fundamentalmente, el clorión y el sulfatión con algo de carbonato y bicarbonato y los iones intercambiables son el calcio y el magnesio. La superficie de un suelo salino está casi siempre cubierta por una costra blanca de sales. Éstas suben por capilaridad y permanecen cuando se ha evaporado, a estos suelos se les llama Alcalinos blancos. Son moderadamente alcalinos, cuando su pH se encuentra alrededor de 8 debido a que, las concentraciones de sodio intercambiable se encuentran en cantidades relativamente bajas. (Pemex, 1988)

Bajo condiciones de una alta concentración de sodio para ser asociado con los coloides se forma un suelo Solonetz. El pH de este suelo es alto debido al sodio absorbido y a la presencia de carbonato sódico. Los coloides del suelo tanto orgánicos como inorgánicos, se dispersan y tienden a descender en el perfil. El color oscuro de la superficie salobre, es formado por costras que son observadas a menudo debido a la materia orgánica disuelta. Ésto da lugar al apelativo de "Alcali-negro" aplicado a estos suelos, Por debajo del horizonte superficial, con temperaturas muy bajas, se halla un horizonte oscuro de arcilla densa. Los suelos Solonetz son muy improductivos debido a sus propiedades químicas tóxicas y a su condición física pobre. Si el drenaje se mantiene en forma favorable en un suelo de este tipo, puede permitir la formación de un soloz. Este suelo tiene un horizonte superficial ácido de color claro por encima de otro horizonte denso y oscuro. (Pemex, 1988)

3.1.4.2 Descripción de términos técnicos

Acrisol. Son suelos que se encuentran en zonas tropicales o templadas muy lluviosas. En condiciones naturales tienen vegetación de selva o bosque. Se caracterizan por tener acumulación de arcilla en el subsuelo; por sus colores rojos, amarillos, o amarillos claros con manchas rojas; y por ser generalmente ácidos o muy ácidos. (INEGI,1991)

Andosol. Son suelos formados en aquellas áreas donde ha habido actividad volcánica reciente, puesto que se originan a partir de cenizas volcánicas. En condiciones naturales tienen vegetación de bosque de pino, abeto, encino, etc., o si los volcanes se encuentran en zona vegetal, tiene vegetación de selva. Se caracterizan por tener una capa superficial de color negro o muy oscura (aunque a veces es clara) y por ser de textura esponjosa o muy sueltos. (INEGI,1991)

Arenosol. Son suelos que se encuentran en zonas tropicales o templadas, y ocasionalmente en zonas áridas. En condiciones naturales tiene vegetación de selva, bosque o matorral, pero en cualquier caso, esta vegetación es escasa. Se caracteriza por ser de textura arenosa. (INEGI,1991)

Cambisol. Estos suelos por ser jóvenes y poco desarrollados, se presentan en cualquier clima, menos en la zona árida. Puede tener cualquier tipo de vegetación, ya que ésta se encuentra condicionada al clima y no por el tipo de suelo. Se caracterizan por presentar en el subsuelo una capa que parece más suelo que roca, ya que en ella se forman terrones, además pueden presentar acumulación de algunos materiales como arcilla, carbonato de calcio, fierro, manganeso, etcétera., pero sin que esta acumulación sea muy abundante. También pertenecen los suelos delgados que están colocados directamente encima de un tepetate (fase dúrica), siempre y cuando no se encuentre en zonas áridas, ya que pertenecerían a otra unidad como Xerosol o Yermosol. (INEGI,1991)

Castañozem. Estos suelos se encuentran en zonas semiáridas o de transición hacia climas más lluviosos. En condiciones naturales tienen vegetación de pastizal, con algunas áreas de matorral. Se caracterizan por presentar una capa superior de color pardo o rojizo oscuro, rica en materia orgánica y nutrientes; y acumulación de caliche suelto o ligeramente cementados en el subsuelo. (INEGI,1991)

Chernozem. Son suelos que se encuentran en zonas semiáridas o de transición hacia climas más lluviosos. En condiciones naturales tienen vegetación de pastizales con algunas áreas de matorral. Se caracterizan por tener una capa superior de color gris o negro, rica en materia orgánica y nutrientes, y acumulación de caliche suelto o ligeramente cementado en el subsuelo. (INEGI,1991)

Feozem. Son suelos que se encuentran en varias condiciones climáticas, desde zonas semiáridas, hasta templadas o tropicales muy lluviosas, así como en diversos tipos de terrenos, desde planos hasta montañosos. Puede presentar cualquier tipo de vegetación en condiciones naturales. Su característica principal es una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y en nutrientes, semejantes a las capas superficiales de Chernozems y Castañozems, pero sin presentar las capas ricas en cal con que cuentan estos dos suelos. (INEGI,1991)

Ferrasol. Son suelos que se presentan típicamente en zonas tropicales muy cálidas y lluviosas. Su vegetación natural es de selva baja o sabana. Se caracteriza por tener, debajo de un horizonte superficial no muy grueso, una capa extremadamente ácida y pobre en nutrientes, de color rojo, amarillo o pardo rosado. (INEGI,1991)

Fluvisol. Se caracteriza por estar formados siempre por materiales acarreados por agua. Están constituidos por materiales disgregados que no presentan estructura de terrones, es decir, son suelos muy poco desarrollados. Se encuentran en todos los climas y regiones. (INEGI,1991)

Gleysol. Son suelos que se encuentran en casi todos los climas, en zonas donde se acumulan y estanca el agua, cuando menos en época de lluvias, como las lagunas costeras, o las partes más bajas y planas de los valles y las llanuras, se caracterizan por presentar, en la parte en donde se saturan con agua, colores grises, azulosos o verdosos, que muchas veces al secarse y exponerse al aire se manchan de rojo. La vegetación natural que presentan estos suelos es generalmente de pastizales, y en algunos casos en las zonas costeras de cañaverales o manglar. Presentan acumulación de salitre. (INEGI,1991)

Histosol. Son suelos de zonas de climas húmedos, ya sea templados o cálidos. Están restringidos a las áreas en donde se acumulan el agua y desechos de muchas plantas que quedan en la superficie sin descomponerse durante mucho tiempo. Se encuentran en zonas pantanosas o en los lechos de antiguos lagos.

Se caracterizan por tener una alta cantidad de materia orgánica, en forma de hojarasca, fibra, madera, humus. En ocasiones tiene un olor a podrido. Su vegetación natural es de pastizal y popal. Se presenta acumulación de salitre. (INEGI,1991)

Litosol. Son suelos que se encuentran en todos los climas diversos tipos de vegetación. Se caracterizan por tener una profundidad menor de 10 cm hasta la roca, tepetate, o caliche duro. (INEGI,1991)

Luvisol. Son suelos que se encuentran en zonas templadas o tropicales lluviosas, aunque en ocasiones se pueden encontrar en climas algo más secos. Su vegetación es de bosque o selva. Se caracterizan por tener, a semejanza de los Acrisoles, un enriquecimiento de arcillas en el subsuelo, pero son más fértiles y menos ácidos que estos. Son frecuentemente rojos o claros, aunque también presentan tonos pardos o grises, que no llegan a ser muy oscuros. (INEGI,1991)

Nitosol. Son suelos que se localizan en ciertas zonas muy lluviosas, tanto cálidas como templadas. Su vegetación natural es, de bosque o selva. Se caracteriza por poseer un subsuelo muy profundo, enriquecido con arcilla. Normalmente tiene una capa superficial delgada, y el subsuelo se extiende desde su límite inferior hasta más de un metro y medio de profundidad. Sus colores son rojizos casi siempre. (INEGI,1991)

Planosol. Estos suelos se presentan en climas semiáridos. Su vegetación natural es de pastizal. Se caracterizan por presentar, debajo de la capa más superficial, una capa más o menos delgada de un material claro que es siempre menos arcilloso que las capas que lo cubren y lo subyacen. Esta capa es árida y ácida, y a veces impide el paso de las raíces. Debajo de la capa mencionada se presenta un subsuelo muy arcilloso e impermeable, o roca o tepetate, también impermeables. (INEGI,1991)

Podzol. Son suelos de climas húmedos templados o semifríos. Su vegetación natural es de bosque. Se caracteriza por tener un subsuelo enriquecido con humus y sustancias abundantes en hierro, que le dan colores negros y rojizos. Son generalmente arenosos y ácidos. (INEGI,1991)

Podzoluvisol. Son suelos de climas húmedos, templados o semifríos. Su vegetación natural es de bosque. Se caracteriza por tener un subsuelo enriquecido con arcilla, de color gris o amarillento, y que presenta grandes manchas rojas. (INEGI,1991)

Ranker. Son suelos de climas templados húmedos, o semifríos húmedos. Su vegetación natural es de bosque. Se caracterizan por tener una capa superficial oscura y rica en humus, pero ácida e infértil. Debajo de ella se presenta la roca, de colores claros generalmente, que nunca es roca caliza o caliche. (INEGI,1991)

Regosol. Son suelos que se pueden encontrar en muy distintos climas y con diversos tipos de vegetación. Se caracterizan por no presentar capas distintas. En general son claros y se parecen bastante a la roca que los subyace, cuando no son profundos. Se encuentran en las playas, dunas y laderas de las sierras mexicanas. (INEGI,1991)

Rendzina. Estos suelos se presentan en climas cálidos o templados con lluvias moderadas o abundantes. Su vegetación natural es de matorral, selva o bosque. Se caracterizan por poseer una capa superficial abundante de humus y muy fértil, que descansa sobre roca caliza o algún material rico en cal. No son muy profundos. Son generalmente arcillosos. (INEGI,1991)

Solonchak. Son suelos que se presentan en diversos climas, en zonas en donde se acumula el salitre, tales como lagunas costeras y lechos de lago, o en las partes bajas de los valles o llanos de las zonas secas. Se caracterizan por presentar un alto contenido de sales en alguna parte del suelo, o en todo él. Su vegetación esta formada por pastizales o por algunas plantas que toleran el exceso de sal. (INEGI,1991)

Solonetz. Estos suelos se localizan en varios climas, en zonas donde se acumulan las sales y en particular, el álcali de sodio. Su vegetación natural, es de pastizales o algunos matorrales. Se caracterizan por tener un subsuelo arcilloso que presenta terrones duros en forma de columnas. Este subsuelo y a veces, otras partes del suelo, presentan un contenido alto de álcali. (INEGI,1991)

Vertisol. Son suelos que se presentan en climas templados y cálidos, en zonas en las que hay una marcada estación seca y otra lluviosa. U vegetación natural va desde las selvas bajas hasta pastizales y matorrales de los climas semisecos. Se caracterizan por las grietas anchas y profundas que aparecen en ellos en la época de sequía. Son suelos muy arcillosos, frecuentemente negros, grises o cafés rojizos. Son pegajosos cuando están húmedos y muy duros cuando están secos. A veces son salinos. (INEGI,1991)

Xerosol. Estos suelos se localizan en las zonas áridas y semiáridas. Su vegetación natural es de matorrales y pastizales. Se caracterizan por tener una capa superficial de color claro y muy pobre en humus. Debajo de ella puede haber un subsuelo rico en arcillas, o bien muy semejante a la capa superficial. Muchas veces presentan a cierta profundidad manchas, polvo o aglomeraciones de cal, y cristales de yeso, o caliche, de mayor o menor dureza. A veces son salinos. (INEGI,1991)

Yermosol. Son suelos que se presentan en las zonas áridas. Su vegetación natural es de matorrales o pastizal. Se caracterizan por tener, a semejanza de los Xerosoles, una capa superficial clara y un subsuelo rico en arcillas o similar a la capa superficial. Presenta también acumulación de cal o yeso en el subsuelo o bien caliche. Se diferencia de los Xerosoles en que su capa

superficial es aún más pobre en humus que estos. A veces son salinos. (INEGI,1991)

3.1.5 Clasificación de suelos

Dentro de la ingeniería civil, al suelo se le ha estudiado por el tamaño de sus partículas, a este estudio se le llama granulometría en donde se ha visto que, en los suelos granulares, los que están bien graduados con una amplia gama de tamaños, tienen un comportamiento más favorable que aquellos que son uniformes, o sea donde predomina un tamaño principalmente. Sin embargo, el comportamiento mecánico e hidráulico está definido por la compacidad y orientación de los granos, características que se destruyen al realizar una prueba granulométrica. Para los suelos finos, las propiedades mecánicas e hidráulicas dependen en tal grado de su estructuración e historia geológica, que el conocimiento de su granulometría resulta en ocasiones inútil.

Algunos tipos de análisis granulométricos son universalmente usadas en la ingeniería para la clasificación de los suelos. Parte de los criterios de suelos convenientes para caminos, campos aéreos, presas, filtros y otras construcciones se basan en el análisis granulométrico, además de obtener una buena predicción sobre el movimiento del agua en el suelo (flujo de agua)(Legorreta, 1998).

El análisis granulométrico es un intento de determinar la proporción relativa de los diferentes tamaños de los granos que se encuentran en una masa de suelo. Actualmente no es posible determinar los tamaños individuales de las partículas de suelo ya que la prueba puede únicamente agrupar los varios rangos de tamaño. Esto es realizado para obtener la cantidad de material que pasa a través de una malla dada pero retenido sobre una malla de menor abertura y entonces relacionando esta cantidad retenida al total de la muestra.

Diferentes instituciones, han clasificado a los suelos de acuerdo al tamaño de partículas; por ejemplo el MIT, ASTM, USBR, etc., pero es la clasificación propuesta por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) la que se utilizará, en este trabajo se observa esta clasificación por tamaños asociados a cierta malla, con la que se realiza un cribado y poder así identificar los tamaños de partículas, lo cual se muestra en las tablas 3.2 y 3.3(Juárez, 2000).

La textura del suelo es una característica importante, ya que afecta las propiedades físicas, químicas y biológicas del mismo.

Los suelos son constituidos por partículas de diferente tamaño, como a continuación se muestra:

Partículas menores de 0.074 mm que forman suelos o pueden estar contenidas en suelos con partículas mayores. Las partículas de este tamaño no se distinguen a simple vista (limos, arcillas), se le llama fracción fina.

Partículas de tamaños comprendidos entre 0.074 mm y 76.4 mm que forman suelos o pueden estar contenidas en suelos con partículas de tamaños menores (grava, arenas), se le denomina fracción media.

Partículas de tamaños mayores que 76.4 mm que no forman suelos pero pueden estar contenidas en suelos de tamaños menores, se les conoce como fragmentos de roca, se le denomina fracción gruesa.

En los suelos de textura fina predomina la arcilla, tienen una mayor superficie activa que los suelos arenosos, poseen mayor capacidad de adsorción de nutrientes, usualmente son más fértiles.

Los suelos arenosos son más porosos y permiten una más rápida infiltración del agua. Sin embargo, los suelos arcillosos son de mayor capacidad de retención de agua debido a su mayor área superficial; tiene un mayor espacio poroso total que los suelos arenosos. Esta diferencia se debe al mayor número de microporos que funcionan en la retención del agua. En los suelos arenosos hay más macroporos que funcionan en el movimiento del aire y del agua.

La textura del suelo se expresa por los nombres de las clases que se encuentran en el triángulo de texturas. Los nombres de las clases de suelo básicamente consisten en los términos: arena, limo, arcilla y migajón o franco, usados como nombre o adjetivo o ambos, como se muestra en la figura 3.1

TABLA 3. 2 CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS POR MEDIO DEL TAMAÑO DE SUS PARTÍCULAS.

MALLA (apertura, en mm)	CLASIFICACIÓN DEL SUELO
3" (76)	Fragmentos de roca
¾" (19)	Grava Gruesa
½" (6.35)	Grava Media
No. 4 (4.76)	Grava Fina
No. 10 (2)	Arena Gruesa
No. 40 (0.42)	Arena Media
No. 200 (0.074)	Arena Fina
< 2 micras	Limo y Arcilla

Fuente: Juárez Badillo, 2000

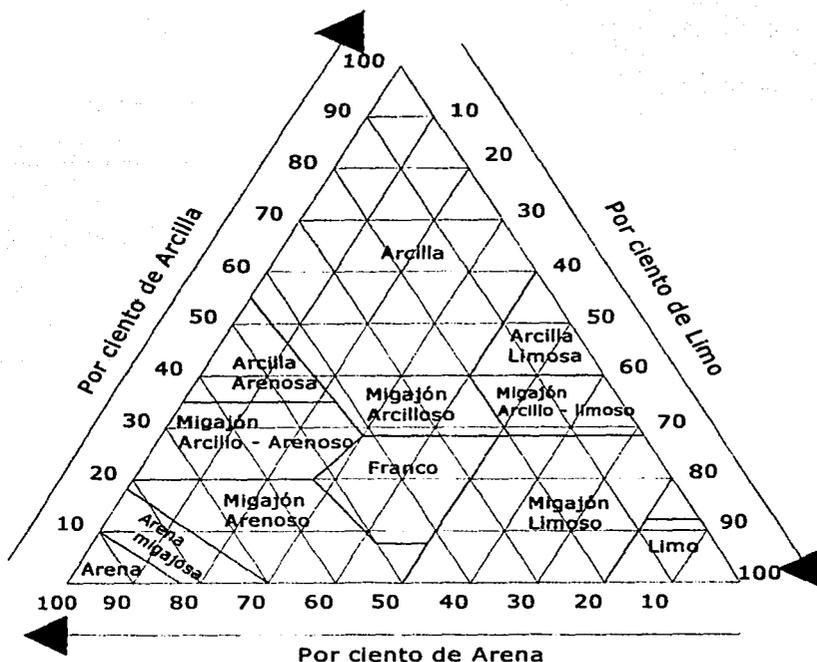


Fig. 3.1 Triángulo de texturas.

TABLA 3.3 CONVENCION PARA LA IDENTIFICACION DE LOS SUELOS BASÁNDOSE EN LA PROPORCION DE SUS FRACCIONES

SUELO	
GRUESO 50 % o más (en peso) queda retenido en la malla No. 200	FINO 50 % o más (en peso) pasa la malla No. 200
GRAVA De lo retenido en la malla No. 200, arriba del 50% (en peso, de la fracción) queda retenido en la malla No. 4.	ARENA 50% o más de la fracción retenida en la malla No. 200 pasa la No. 4.

Fuente: Juárez Badillo, 2000

El análisis granulométrico es un intento de determinar la proporción relativa de los diferentes tamaños de los granos que se encuentran en una masa de suelo.

3.1.6 Ley de Darcy

En 1856 Henri Darcy, investigó las características del flujo del agua a través de filtros, formado por materiales térreos, Darcy encontró que para velocidades suficientemente pequeñas. La cual se expresa de la siguiente forma:

$$Q = -KA \frac{dh}{dl}$$

(3.1.1)

Donde:

Q= Descarga del lixiviado por unidad de tiempo (m³/año).

K= Coeficiente de permeabilidad, (m/año).

A= Área en perfil a través de la cual corre el lixiviado, (m²).

dh/dl = Gradiente hidráulico.

h= Perdida de carga (m).

l = Longitud del camino del flujo (m).

El signo negativo viene del hecho de que la pérdida por carga, dh, siempre es negativa. El coeficiente de permeabilidad también se conoce como conductividad hidráulica, permeabilidad efectiva o coeficiente de filtración.

La ecuación anterior se basó inicialmente en observaciones hechas por Darcy para el flujo de agua a través de arenas limpias, es válida para condiciones de flujo laminar y aplicable para un amplio rango de suelos.

Un flujo se define como laminar cuando las líneas de flujo permanecen sin juntarse entre sí en toda su longitud. El flujo turbulento ocurre cuando la condición anterior no se cumple. A velocidades bajas el flujo ocurre en forma laminar, mientras que al aumentar aquéllas se llega a un límite en que se transforma a turbulento.

3.1.7 Coeficiente de permeabilidad

El coeficiente de permeabilidad de los suelos depende de varios factores:

- La viscosidad del fluido.
- La distribución granulométrica.
- La relación de vacíos.
- El grado de saturación del suelo.

En los suelos arcillosos, la estructura juega un papel muy importante en el coeficiente de permeabilidad. Otros factores que afectan la permeabilidad en las arcillas son las concentraciones de iones y los espesores en los estratos de agua atrapada por una partícula de arcilla.

El valor del coeficiente de permeabilidad varía en un amplio rango dependiendo del tipo de suelo. En la tabla 3.4 se muestra algunos valores de coeficientes.

TABLA 3.4 COEFICIENTES DE PERMEABILIDAD.

TIPO DE SUELO	K(cm/s)
Arena gruesa uniforme	0.470
Arena mediana uniforme	0.116
Arena y grava bien graduadas y limpias.	0.116
Arena fina uniforme	0.005
Arena de lodo y grava bien graduada	$4.63 E^{-04}$
Arena de lodo	$1.16 E^{-04}$
Lodo uniforme	$4.63 E^{-05}$
Arcilla arenosa	$4.63 E^{-06}$
Arcilla de lodo	$1.16 E^{-07}$
Arcilla (tamaño de arcilla del 30 al 50%)	$1.16 E^{-08}$
Arcilla coloidal	$1.16 E^{-09}$
Limo	0.001

Fuente: Tchobanoglous G., Thelsen H. Y Ellassen R.

3.1.8 Tiempo de filtración

El tiempo de filtración, en años que tarda un lixiviado en traspasar un recubrimiento de arcilla de un espesor dado puede estimarse utilizando la siguiente ecuación (Tchobanoglous,1994):

$$t = \frac{d^2 \alpha}{K(d+h)} \quad (3.1.2)$$

Donde:

- t= tiempo de filtración,(años).
- d= espesor del recubrimiento de arcilla,(m).
- α = Porosidad efectiva.
- K= coeficiente de permeabilidad,(m/año).
- h= carga hidráulica, (m).

Los valores típicos para porosidad efectiva para arcillas con un coeficiente de permeabilidad dentro del rango 10^{-6} a 10^{-8} cm/seg. Variarán de 0.1 a 0.3 según el tipo de arcilla.

Hay varios procedimientos para la determinación de la permeabilidad de los suelos:

a) Directos.

- Permeámetro de carga constante.
- Permeámetro de carga variable.
- Prueba directa de los suelos en el lugar.

b) Indirectos.

- Cálculo a partir de la curva granulométrica.
- Cálculo a partir de la prueba de consolidación.
- Cálculo con la prueba horizontal de capilaridad.

En la figura 3.2 debida a Casagrande y Fadum, aparecen las interrelaciones entre el coeficiente de permeabilidad, los tipos de suelo y los métodos de prueba aplicada en cada caso. El valor del coeficiente de permeabilidad se ha puesto en escala logarítmica en un rango de 10^2 y 10^{-9} cm/seg.

3.2 MARCO LEGAL

Dentro del marco jurídico se encuentran varias leyes, las cuales regulan la calidad ambiental en México las cuales son: La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, publicada en 1917, la cual contempla la conservación ecológica de los recursos naturales, la cual declara que " la propiedad de las tierras y aguas" corresponden a la nación; asimismo el derecho de regular en beneficio social "el aprovechamiento de los recursos naturales susceptibles de aprobación". Estos conceptos se expresan en el contexto de los artículos 25 y 27 del propio ordenamiento, y la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), publicada en 1988, la cual agrupa un conjunto de normas específicas sobre una misma materia, en este caso, la protección ambiental. Esta ley surgió a partir de las modificaciones hechas a los artículos 27 y 73 constitucionales, a fin de establecer una regulación ambiental de mayor alcance y más acorde con las necesidades del país. A continuación se presenta el capítulo IV de la misma en donde se habla sobre la prevención y control de la contaminación del suelo.

3.2.1 Contaminación de suelo

3.2.1.1 Ley General Del Equilibrio Ecológico Y La Protección Al Ambiente(LGEEPA)

Titulo Cuarto Protección Al Ambiente

Capítulo IV. Prevención Y Control De La Contaminación Del Suelo

Artículo 134

Para la prevención y control de la contaminación del suelo, se consideraran los siguientes criterios:

- I.- Corresponde al estado y la sociedad prevenir la contaminación del suelo;
- II.- Deben ser controlados los residuos en tanto que constituyen la principal fuente de contaminación de los suelos;
- III.- Es necesario prevenir y reducir la generación de residuos sólidos, municipales e industriales; incorporar técnicas y procedimientos para su rehuso y reciclaje, así como regular su manejo y disposición final eficientes;

	10 ²	10 ¹	1.0	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹
Propiedad de drenaje	Buen drenaje			Mal drenaje						Prácticamente impermeable		
Aplicación en presas de tierra y diques	Sección permeable de presas y diques					Sección impermeable de presas y diques						
Tipos de suelos	Grava limpia		Arenas limpias mezcla de grava y arenas limpias			Arenas muy finas. Limos orgánicos e inorgánicos. Mezcla de arena, limo, y arcilla morena glacial. Depósito de arcillas estratificados, etc.				Suelos "impermeables", v.g. Arcillas homogéneas abajo de la zona de intemperismo.		
						"Suelos Impermeables" que han sido modificados por los efectos de la vegetación y del intemperismo.						
Determinación directa del coeficiente de permeabilidad	Prueba directa de los suelos en su posición original (v.g. pozos de bombeo) confiable si se conduce apropiadamente. Requiere considerable experiencia.											
	Permeámetro de carga constante requiere de poca experiencia.					Permeámetro de carga variable.						
	Confiable requiere de poca experiencia.					Rango de permeabilidad inestable. Requiere de mucha experiencia para una correcta interpretación.				Aceptable. Requiere considerable experiencia.		
Determinación indirecta del coeficiente de permeabilidad	Cálculo de la distribución granulométrica (v.g. fórmula de A. Hazen) Aplicable únicamente a gravas y arenas limpias sin cohesión.											
						Prueba horizontal de capilaridad. Requiere muy poca experiencia, especialmente útil para la prueba rápida de un gran número de muestras en el campo sin equipo de laboratorio.					Cálculo de las pruebas de consolidación. Equipo de laboratorio costoso. Requiere considerable experiencia.	

Fig. 3.2 Coeficiente de permeabilidad "K" en cm/seg. (Escala log.).

IV.- La utilización de plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas, debe ser compatible con el equilibrio de los ecosistemas.

V.- En los suelos contaminados por la presencia de materiales o residuos peligrosos, deberán llevarse a cabo las acciones necesarias para recuperar o restablecer sus condiciones, de tal manera que puedan ser utilizados en cualquier tipo de actividad prevista por el programa de desarrollo urbano o de ordenamiento ecológico que resulte aplicable.

Artículo 135

Los criterios para prevenir y controlar la contaminación del suelo se consideran, en los siguientes casos:

I.- La ordenación y regulación del desarrollo urbano;

II.- La operación de los sistemas de limpia y de disposición final de residuos municipales en rellenos sanitarios;

III.- La generación, manejo y disposición final de residuos sólidos, industriales y peligrosos, así como en las autorizaciones y permisos que al efecto se otorguen.

IV.- El otorgamiento de todo tipo de autorizaciones para la fabricación, importación, utilización y en general la realización de actividades relacionadas con plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas.

Artículo 136

Los residuos que se acumulen o puedan acumularse y se depositen o infiltren en los suelos deberán reunir las condiciones necesarias para prevenir o evitar:

I.- La contaminación del suelo;

II.- Las alteraciones nocivas en el proceso biológico de los suelos;

III.- Las alteraciones en el suelo que perjudique su aprovechamiento, uso o explotación, y

IV.- Riesgos y problemas de salud.

Artículo 137

Queda sujeto a la autorización de los gobiernos de los estados o en su caso, de los municipios, con arreglo a las normas técnicas ecológicas que para tal efecto expida la secretaria, el funcionamiento de los sistemas de recolección, almacenamiento, transporte, alojamiento, rehuso, tratamiento y disposición final de residuos sólidos municipales. Los materiales y residuos peligrosos se sujetaran a lo dispuesto en el capítulo V de este mismo título.

Artículo 138

La secretaria promoverá la celebración de acuerdos de coordinación y asesoría con los gobiernos estatales y municipales para:

I.- La implantación y mejoramiento de sistemas de recolección, tratamiento y disposición final de residuos sólidos municipales; y

II.- La identificación de alternativas de reutilización y disposición final de residuos sólidos municipales, incluyendo la elaboración de inventarios de los mismos y sus fuentes generadoras.

Artículo 139

Toda descarga, depósito o infiltración de sustancias o materiales contaminantes en los suelos se sujetará a lo que disponga esta ley, la ley de aguas nacionales, sus disposiciones reglamentarias y las normas oficiales mexicanas que para tal efecto expida la secretaria.

Artículo 140

La generación, manejo y disposición final de los residuos de lenta degradación deberá sujetarse a lo que se establezca en las normas oficiales mexicanas que al respecto expida la secretaria, en coordinación con la secretaria de comercio y fomento industrial.

Artículo 141

La secretaria, en coordinación con las secretarías de comercio y fomento industrial y de salud, expedirán normas oficiales mexicanas para la fabricación y utilización de empaques y envases para todo tipo de productos, cuyos materiales permitan reducir la generación de residuos sólidos.

Asimismo, dichas dependencias promoverán ante los organismos nacionales de normalización respectivos, la emisión de normas mexicanas en las materias a las que se refiere este precepto.

Artículo 142

En ningún caso podrá autorizarse la importación de residuos para su derrame, depósito, confinamiento, almacenamiento, incineración o cualquier tratamiento para su destrucción o disposición final en el territorio nacional o en las zonas en las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción. Las autorizaciones para el tránsito por el territorio nacional de residuos no peligrosos con destino a otra nación, solo podrán otorgarse cuando exista previo consentimiento de esta.

Artículo 143

Los plaguicidas, fertilizantes y demás materiales peligrosos, quedaran sujetos a las normas oficiales mexicanas que expidan en el ámbito de sus respectivas competencias, la secretaria y las secretarías de agricultura, ganadería y desarrollo rural, de salud y de comercio y fomento industrial. El reglamento de esta ley establecerá la regulación, que dentro del mismo marco de coordinación deba observarse en actividades relacionadas con dichos materiales, incluyendo la disposición final de sus residuos, empaques y envases vacíos, medidas para evitar efectos adversos en los ecosistemas y los procedimientos para el otorgamiento de las autorizaciones correspondientes.

Artículo 144

Atendiendo a lo dispuesto por la presente ley, la ley federal de sanidad vegetal y las demás disposiciones legales y reglamentarias aplicables, la secretaria coordinadamente con las secretarías de salud, de agricultura, ganadería y desarrollo rural y de comercio y fomento industrial, participara en la determinación de restricciones arancelarias y no arancelarias relativas a la importación y exportación de materiales peligrosos.

No podrán otorgarse autorizaciones para la importación de plaguicidas, fertilizantes y demás materiales peligrosos, cuando su uso no este permitido en el país en el que se hayan elaborado o fabricado.

3.2.2 Restauración de suelos

En ausencia de normatividad que establezca niveles de limpieza a alcanzar en los suelos contaminados durante el saneamiento, se han utilizado referencias internacionales. La experiencia sugiere la necesidad de realizar estudios de evaluación de riesgo para cada caso particular; sin embargo, se necesita una reglamentación propia que establezca un procedimiento uniforme para realizar dichos estudios, pues los diversos enfoques de evaluación de riesgo puedan dar como resultado un intervalo muy amplio en las concentraciones permisibles.

En julio de 1996, cuando sé público el Reglamento Interior de la Secretaria de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP), las actividades sobre restauración de suelo contaminados a la PROFEPA(Roldán,2001).

Por tal motivo, con base en lo dispuesto en la Ley General Del Equilibrio Ecologico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) y en el reglamento interior de la SEMARNAP, se confirieron a la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) atribuciones específicas en materia de restauración de suelos contaminados como el derecho de toda persona a vivir en un medio sano, preservado y restaurado y, la prevención y control de la contaminación de aire, agua y suelo; estableciendo los mecanismos de coordinación, inducción y concertación entre las autoridades y los sectores social y privado (ibídem).

En las fracciones VI y VII del artículo 68 del reglamento interior de SEMARNAT, la Dirección General del Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental (DGCNICA) cuenta con atribuciones para formular programas para la evaluación, restauración y seguimiento de daños ambientales, así como para elaborar programas para la identificación, evaluación y restauración de sitios contaminados, por lo tanto cuando ocurren accidentes en los que se involucran materiales y/o residuos peligrosos la DGCNICA recomienda que la PROFEPA ordene al responsable efectuar (ibídem):

- Un estudio de evaluación de daños ambientales, incluyendo todos los componentes que fueron afectados, así como una estimación sobre el grado de afectación.
- Propuesta de restauración, que debe contener la tecnología que piensa aplicarse, los niveles de limpieza propuestos, las áreas a tratar y el tiempo necesario para cada una de las fases de restauración.
- Investigación del accidente, que consiste en analizar, cual fue la causa raíz que originó el accidente.

Para establecer límites de limpieza, la PROFEPA gestionó la creación del "grupo de trabajo sobre restauración de sitios contaminados con materiales y residuos peligrosos", el objetivo del grupo es proponer:

- Criterios, lineamientos y niveles de limpieza.
- Técnicas y métodos de análisis de laboratorio.
- Documentar métodos exitosos y no exitosos.
- Participar en la elaboración de un registro de restauración (RDR).
- Proponer programas de seguimiento posteriores al tratamiento.

El INE establece normas y criterios ecológicos para restaurar la calidad del ambiente y clasifica los suelos de acuerdo a al notificación de su contaminación (ibídem):

- Emergencias ambientales.
- Auditorias ambientales.
- Verificación industrial.
- Abandonados.
- Notificación voluntaria.

El procedimiento de la PROFEPA para la restauración de suelos contaminados es (ibídem):

- Detección del sitio.
- Evaluación del daño.
- Propuesta de restauración.
- Seguimiento y conclusiones.

En términos de legislación vigente, el responsable de un derrame o fugas de material peligroso, debe realizar las actividades enfocadas a limpieza de sitios. Empleando así las tecnologías de restauración existentes.

Los límites de limpieza que elaboró la PROFEPA no se emplean para éste trabajo, ya que se elaboraron para otro tipo de contaminantes, por lo que solo se menciona la existencia de estos.

3.3 PROCESOS DE CONTAMINACIÓN

La emisión de lixiviados tiene como origen la descomposición de los residuos sólidos los cuales producen líquidos percolados o lixiviados que al abandonar el relleno pasan a los alrededores y los afecta de manera nociva.

Hay distintos tipos de líquidos que podrían ser causa de procesos de lixiviados, los cuales son:

- La precipitación caída directamente sobre el relleno sanitario.
- El flujo superficial que desemboca en el relleno sanitario.

- La penetración de aguas subterráneas hacia las capas inferiores del relleno sanitario.

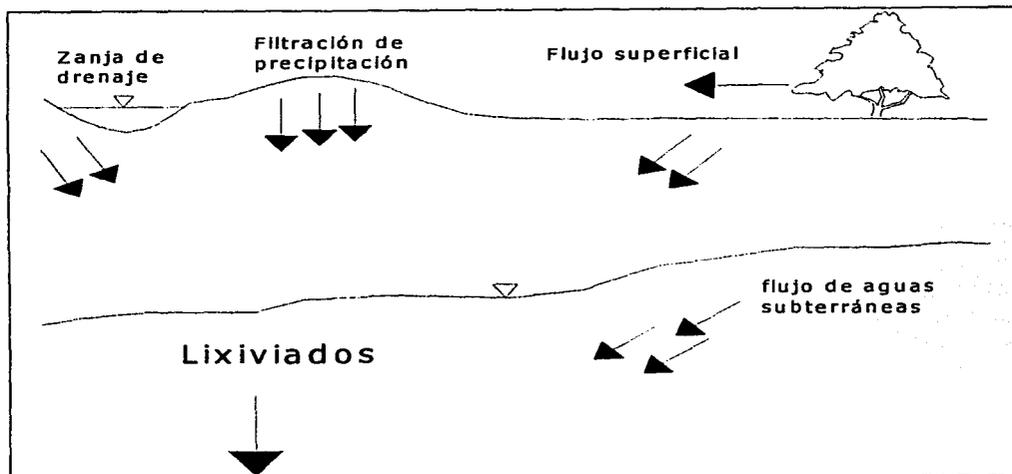


Fig. 3.3 Origen de los fluidos lixiviados en un relleno sanitario.

Además de estas causas están las resultantes de verter el líquido sobre rellenos. Excepto en el caso de filtración por precipitación directa es posible controlar este tipo de lixiviados ubicando adecuadamente los rellenos y aplicando tecnologías correctas.

Los residuos, especialmente los orgánicos, al ser compactados por maquinaria pesada liberan agua y líquidos orgánicos, contenidos en su interior, el que se escurre preferencialmente hacia la base de la celda. Los residuos sólidos, recuperan lentamente parte de estos líquidos al cesar la presión de la maquinaria, pero parte de él permanece en la base de la celda. Por otra parte la descomposición anaeróbica comienza actuar rápidamente en el relleno sanitario, produciendo cambios en la materia orgánica, primero de sólido a líquido y luego de líquido a gas, pero es la fase de licuefacción la que ayuda a incrementar el contenido de líquido en el relleno y a la vez su potencial contaminante. En ese momento se puede considerar que los residuos están completamente saturados y cualquier agua, ya sea subterránea o superficial, que se filtre, lixiviará a través de los residuos sólidos arrastrando consigo sólidos en suspensión y compuestos orgánicos en solución, contaminando así el suelo y el agua subterránea gracias a un proceso de división, el cual se describe en el punto 3.3.2.5. La concentración de una sustancia en agua depende de la cantidad de material lixiviado del residuo, de la capacidad de traslado de su masa y de la proporción existente entre la profundidad de la columna (el grosor del residuo en el relleno en sentido vertical) y el grado de filtración. Otros factores relevantes son la solubilidad de la sustancia contaminante, la superficie, el tiempo de contacto y el pH.

En rellenos planificados con lixiviación mínima la concentración de componentes de un residuo en el lixiviado puede ser similar a su solubilidad en estado de equilibrio si existe una masa suficiente de material lixiviable, ya que el período de estancia en estos rellenos puede llegar a superar los veinte años. No obstante, pueden producirse inconvenientes tales como la consolvación (mezcla de agua disolventes), capaz de provocar concentraciones de sustancias contaminantes mayores de las que puede soportar el agua y superan su capacidad equilibrada de solubilidad. En un relleno, se dan procesos de demora tales como determinadas transformaciones químicas y biológicas que alteran las sustancias contaminantes y su composición. Debido a estas causas la presencia de sustancias contaminantes y su concentración en el lixiviado puede variar dentro del mismo relleno. Pese a que existen procedimientos analíticos e informáticos para la predicción de concentraciones de lixiviados, el método más confiable es la recolección y el análisis de muestras en campo sobre el relleno (LaGrega, 1996).

Todo relleno que cumpla con la normatividad establecida deberá regular la captación y eliminación de lixiviados, ya que existe siempre un cierto grado de filtración en la base. El grado de filtración a través de bases compactas depende de la conductividad hidráulica de los materiales que componen el terreno, no siendo el caso de bases con revestimiento de membrana flexible. El deterioro producido por el tiempo en estas membranas, así como las picaduras, grietas y suturas incorrectamente soldadas facilitan la aparición de aperturas y de filtraciones en el revestimiento y la inevitable difusión de contaminantes.

Existen una gran variedad de procesos de operaciones unitarias, químicos y biológicos diferentes a los anteriores citados que afectan a este tipo de traslado. Algunos contribuyen a su desaceleración mientras que otros provocan su aceleración. En la tabla 3.5 aparece uno de los procesos naturales que afectan al transporte de sustancias contaminantes.

Como consecuencia de los procesos que impiden el traslado de sustancias contaminantes, bien por la eliminación o debido a la inmovilización de las que se encuentran en condiciones libres. Es fundamental tener en cuenta que las sustancias contaminadas inmovilizadas no son transformadas y que estos procesos son reversibles, especialmente cuando la concentración de sustancias contaminantes en las aguas subterráneas disminuye o su retardo es elevado. Como resultado de estos procesos reversibles, las sustancias contaminantes que se retardan vuelven a su estado soluble tras un cierto periodo de tiempo, provocando una larga estela de contaminación.

La atenuación incluye dos clases distintas de procesos:

1. La eliminación irreversible.
2. La transformación.

La eliminación por medio de procesos de atenuación se diferencia del retardo en que se produce una reducción de la masa de sustancias. El proceso de atenuación más conocido es el de la transformación de la estructura molecular de las sustancias.

Algunos de estos procesos contribuyen al aumento de movilidad de las sustancias químicas en el subsuelo, como sucede tras la disolución de sustancias orgánicas y la complejización de iones metálicos, procesos conocidos como fenómenos activadores de la movilidad.

Los suelos por lo general presentan un gran potencial de retención de contaminantes debido a su capacidad de intercambio catiónico, lo cual provoca que los iones positivos presentes en el lixiviado se adhiera al suelo, mecanismo conocido como adsorción.

TABLA 3.5 PROCESOS NATURALES QUE AFECTAN EL TRASLADO DE SUSTANCIAS CONTAMINANTES.

TIPO DE PROCESOS	PROCESO
Operaciones Unitarias	Advección
	Dispersión
	Difusión
	Estratificación por densidad
	Flujo de fluidos en fase no acuosa
	Flujo medio fracturado
Proceso Químico	Reacción de Oxidación
	Intercambio de iones
	Complejización
	Precipitación
	División en fase inmiscible
	Absorción
Procesos biológicos	Degradación aeróbica
	Degradación anaeróbica
	Cometabolismo
	Absorción biológica

Fuente: LaGrega M.

A continuación se presentará la descripción de los procesos.

3.3.1 Operaciones unitarias

3.3.1.1 Advección

Es el transporte de sustancias contaminantes en corrientes acuáticas de flujo a una velocidad media lineal de filtración. A escala macroscópica es el medio poroso el que regula la tasa de flujo y su dirección, a escala microscópica el

medio poroso se encuentra compuesto por partículas sólidas discretas y por espacios porosos o vacíos (LaGrega, 1996).

3.3.1.2 Dispersión

Es una mezcla del flujo de aguas; el flujo de agua al encontrarse con las partículas sólidas del medio poroso, altera su curso y circula hacia la derecha o hacia la izquierda de dichas partículas o hacia ambos lados (LaGrega, 1996).

3.3.1.3 Difusión

Es cuando las sustancias contaminantes (componentes iónicos y moleculares) se trasladan de áreas de mayor a áreas de menor concentración. El gradiente de concentración es la diferencia existente entre la concentración de sustancias contaminantes y la distancia existente entre las diversas concentraciones. (ibídem)

3.3.1.4 Estratificación por densidad

Para poder entender este concepto se presentará a continuación una descripción del experimento de laboratorio de Darcy, el cual consiste en lo siguiente:

En la figura 3.4 se muestra el experimento de laboratorio de Darcy sin diferencias de carga hidráulica entre los dos extremos de la muestra. En el instante t_0 se produce una concentración C_0 en el extremo izquierdo de la columna del medio poroso y una concentración cero en su extremo derecho, manifestando por lo tanto diferentes concentraciones entre los extremos de la muestra. En vista de que no existe diferencia de carga hidráulica, tanto el gradiente hidráulico como el flujo de Darcy y el traslado advectivo equivalen a cero. Sin embargo las sustancias contaminantes se van trasladando a través de la muestra como resultado del gradiente químico de concentración, resultando una concentración final inferior a 1.0 en el extremo derecho de la columna. Esta concentración dependerá tanto de la concentración inicial como del volumen total de arena y agua empleados. En caso de que se añadan sustancias contaminantes en el extremo izquierdo de la muestra durante la difusión para poder mantener la concentración inicial C_0 la tasa de concentración en equilibrio alcanzaría 1.0 en el extremo derecho. (ibídem)

3.3.1.5 Flujo de fluidos en fase no acuosa

La predicción del traslado de sustancias contaminantes se complica aún más debido a la presencia de líquidos en fase no acuosa (LFNA). Muchos compuestos líquidos orgánicos se caracterizan por su inmiscibilidad, es decir, su escasa solubilidad en agua. Estos compuestos orgánicos casi insolubles se dan frecuentemente en el subsuelo en fases líquidas independientes, normalmente con distinta densidad y viscosidad a la del agua. Un LFNA de mayor densidad que el agua se denomina sumergidor (líquido denso en fase no

acuosa[LDFA]). Los de menor densidad, se llaman flotantes (líquidos ligeros en fase no acuosa [LLFA]). El traslado de LFNA depende de las fuerzas gravitacionales y de las diferencias de carga hidráulica. (ibídem)

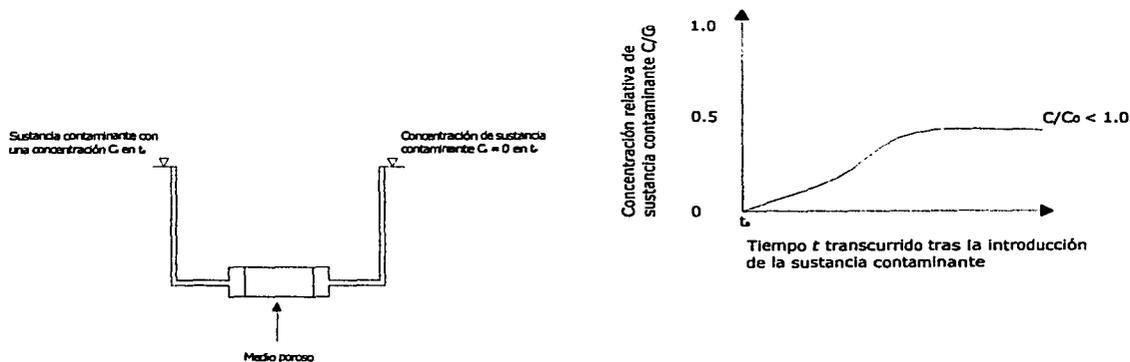


Fig. 3.4 Consecuencias de la difusión en el traslado de sustancias contaminantes sin transporte advectivo.

3.3.1.6 Flujo medio fracturado

El flujo y traslado consecuente de sustancias contaminantes se producirá sobre todo, a lo largo de grietas y fracturas, y no a través del cuerpo rocoso ya que el flujo tiende a ser canalizado que a ser filtrado por medios porosos.

Existen investigaciones que describen el flujo y el transporte en sistemas rocosos fracturados:

1. Sistema rocoso fracturado o medio poroso equivalente (MPE).
2. Estudio discreto de las fracturas con canales caracterizados por la existencia de dos bandas paralelas y de un sistema combinado de fracturas individuales.

La heterogeneidad del medio poroso también altera los procesos de traslado, ya que se provoca una variación espacial de las propiedades hidráulicas y del transporte debida al tipo de características geológicas. (ibídem)

3.3.2 Procesos químicos

3.3.2.1 Reacciones de oxidación y reducción

Las reacciones de oxidación y reducción química (redox) pueden producirse tanto con sustancias químicas orgánicas como inorgánicas y producen generalmente el aumento o la pérdida de oxígeno. La reacción que provoca el aumento de la cantidad de oxígeno se llama oxidación. De modo similar, el

proceso de reducción consiste en la pérdida de oxígeno. En el caso de sustancias químicas orgánicas la oxidación es una reacción que supone para dichas sustancias una pérdida de electrones (la sustancia química que cede el electrón es la que sufre los procesos de oxidación). La reducción, el proceso contrario, consiste en la obtención de electrones. En el caso de sustancias inorgánicas disueltas la oxidación conlleva de nuevo una pérdida o ganancia de electrones, y queda definida con mayor precisión como la reacción que aumenta el estado de oxidación de un átomo (la carga del átomo es más positiva). (ibídem)

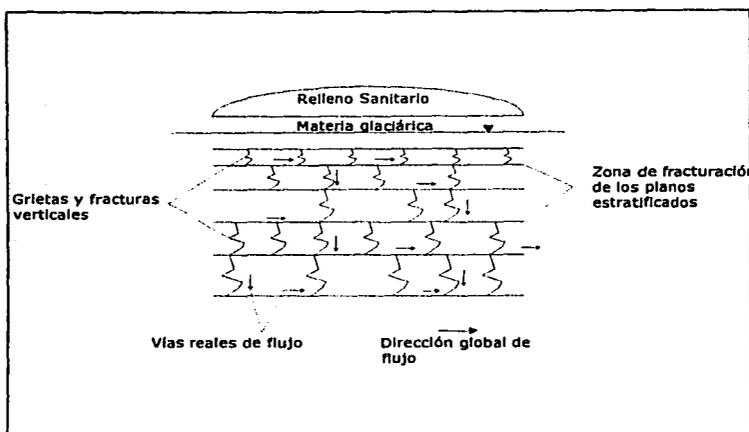


Fig. 3.5 Esquema de flujo saturado.

3.3.2.2 Intercambio de iones

El intercambio de iones consta de un proceso en el cual los iones son sorbidos en soluciones que se acumulan sobre las áreas superficiales discretas con carga opuesta de las partículas. Este fenómeno es estimulado por fuerzas de atracción que contribuyen a la neutralidad electrostática y a equilibrar la carga eléctrica superficial del suelo con una carga opuesta equivalente de iones libres. Por ejemplo un ion de suelo de débil afinidad se intercambia con otro de la solución, como en el caso de los iones de calcio en aguas subterráneas, que en la superficie arcillosa pueden sustituir a los iones de sodio (ibídem). A continuación se presenta un ejemplo ilustrativo: se trata de un suelo de clima templado, donde se tiene arcilla montmorillonítica predominante y con una capacidad de intercambio de cationes de 35 meq/100g de suelo como se muestra en la tabla 3.6.

No todos los cationes tiene igual poder de reemplazamiento en el complejo coloidal. La fuerza de adsorción de un catión depende de su radio iónico, de su carga y de su grado de hidratación. Experimentalmente, se ha encontrado el

siguiente orden descendente de energía de adsorción catiónica, llamada serie liotrópica (Ortiz,1990).

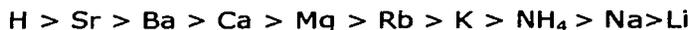


TABLA 3.6 CATIONES INTERCAMBIABLES EN 100 G DE SUELO SECO (pH 6.85).

Ion	Cantidad en mg	Peso atómico equivalente	meq.
Ca ⁺⁺	420	40/2	21
Mg ⁺⁺	72	24/2	6
Na ⁺	46	23	2
K ⁺	78	39	2
H ⁺	4	1	4
Capacidad de Intercambio			T=35
Cationes básicos (Ca,Mg,Na,K)			S = 31
Por ciento de saturación de bases (V = 100 S/T)			V= 88.51%

3.3.2.3 Complejización

La complejización o quelación es la formación de un enlace coordinado entre un ion de metal y un anión ligante que llega a formar un complejo en el cual los ligantes llegan a rodear al ion. La complejización provoca el aumento de movilidad del metal debido a:

- El metal complejizado es más soluble.
- El complejo sirve como enlace para lo que de otra forma serían iones metálicos libres, disminuyendo así sus posibilidades de adsorción o precipitación.

El ligante puede ser inorgánico u orgánico. (ibídem)

3.3.2.4 Precipitación

La precipitación es el proceso contrario a la disolución, y consiste en que cualquier sustancia disuelta excedente se transforma en sólida debido a que su concentración sobrepasa a la solubilidad de un componente concreto, teniendo como consecuencia su precipitación al exterior de la solución. La fracción de sustancias que se separa de la solución se denomina precipitado. Este proceso es de tipo reversible ya que si la concentración de una sustancia disuelta desciende a un nivel inferior al de su solubilidad, podría producirse la disolución de sustancias previamente precipitadas. La precipitación puede producirse cuando una reacción química disminuye de forma relevante la capacidad de solubilidad de una sustancia disuelta, normalmente debido a la mezcla de un precipitante con una solución. De modo similar, las alteraciones en la oxidación pueden provocar este fenómeno. (ibídem)

3.3.2.5 División en fase inmisible

Los fluidos inmiscibles que se encuentran en el subsuelo, pueden encontrarse en tres distintas fases:

1. Como producto libre.
2. Absorbido a las partículas del suelo y a las grietas de la matriz del subsuelo.
3. Disueltos en las aguas subterráneas y superficiales.

La cantidad existente en cada una de estas fases dependerá de las propiedades del subsuelo y de las de la sustancia inmisible. En la mayoría de los casos la masa de la fase disuelta es inferior a la existente en la fase de producto libre, estas últimas fases suponen una vía continua de escape y expansión de sustancias contaminantes en aguas subterráneas. (ibídem)

3.3.2.6 Absorción

La absorción es el proceso mediante el cual una sustancia se transfiere de un fluido (líquido o gas) a un líquido o sólido absorbente quedando disuelta en él. No es preciso que la sustancia absorbente se encuentre en estado sólido, en el caso específico del destino de las sustancias contaminantes en el subsuelo, la absorción supone principalmente una acumulación de sustancias químicas orgánicas en las superficies del suelo; tiene como consecuencia la división de las sustancias contaminantes orgánicas disueltas (sustancias solubles) de las aguas subterráneas o superficiales (solvente) en materiales subterráneos naturales (absorbente). Es el caso de la adhesión de moléculas orgánicas a la materia húmica natural del suelo. La desorción es el proceso inverso, es decir la transferencia de un componente en un sólido o líquido a un gas. (ibídem)

3.3.3 Procesos biológicos

3.3.3.1 Degradación aeróbica

Se puede considerar que sigue una cinética de primer orden respecto a la concentración de los reactivos que intervienen en el proceso bioquímico, que son: contaminante, oxígeno y los nutrientes fósforo y nitrógeno. (ibídem)

$$v = (k)(C_C)(C_O)(C_N)(C_P) \quad (3.3.1)$$

V= La velocidad de desaparición de contaminante.

K= La constante cinética.

La relación de concentración O:N:P necesaria para que pueda desarrollarse la biodegradación es, 100:5:1, también es necesaria cantidades pequeñas de otros elementos como K, Mg, Ca, Fe, Na, Co, Zn, Mo, Cu y Mn.

La constante de velocidad de biodegradación depende de los siguientes parámetros:

- La naturaleza química del contaminante, que determina el microorganismo específico que participa en la reacción.
- El tiempo de aclimatación de los microorganismos en el suelo.
- El grado de toxicidad del contaminante.
- El pH del suelo. Por lo general, el pH óptimo para la biodegradación se encuentra entre 5 y 9.
- La temperatura. Normalmente, por debajo de los 18°C los procesos bioquímicos suelen ser lentos, como también lo son a temperaturas relativamente altas (arriba de los 30 °C).
- El grado de agitación, como cualquier proceso químico, se favorece el contacto entre reactivos.
- El grado de humedad del suelo. Hay que tener en cuenta que el medio líquido favorece la difusión de los reactivos al centro de reacción.

3.3.3.2 Degradación anaeróbica

La mayor parte de las sustancias orgánicas del subsuelo se transforman en moléculas de menor tamaño debido a los mecanismos de oxidación y de reducción producidos por la actividad metabólica de los microorganismos naturales; a este proceso se le llama biodegradación. La biodegradación anaeróbica ocurre en el subsuelo a velocidad muy lenta (debido a la escasa cantidad de oxígeno) pero, favorece la deshalogenación de los componentes clorados que resisten, a menudo, a la degradación aeróbica. Pero no siempre transforma los componentes orgánicos en materiales de menor toxicidad y mayor lentitud. (ibídem)

3.3.3.3 Cometaabolismo

Se produce la transformación de un compuesto por las enzimas de los microorganismos que habitualmente degradan otros compuestos, llamada también degradación sintrófica, el microorganismo no utiliza el compuesto tóxico ni como fuente de carbono, ni como fuente de energía, si no que obtiene ambos a partir de otras sustancias. En el caso del sintrofismo, la degradación no reporta un beneficio aparente para el microorganismo y es el producto de reacciones catalizadas por enzimas que tienen otros usos en el organismo. (ibídem)

3.3.3.4 Absorción biológica

Se define como la eliminación, a través de material biológico de compuestos metálicos, tanto en disolución como formando partículas sólidas insolubles. Como material biológico, se pueden utilizar distintos tipos de microorganismos, como por ejemplo, bacterias, algas, hongos o levaduras.

Todos estos microorganismos, según sea su naturaleza, pueden acumular en su interior metales, alcanzando en algunos casos, cantidades que superan el 100% de su peso en seco. En tabla 3.7 se muestra la relación de algunos microorganismos capaces de eliminar metales y sus tasas de eliminación. (ibídem)

TABLA 3.7 RELACIÓN DE MICROORGANISMOS CAPACES DE ELIMINAR METALES Y SU TASA DE ELIMINACIÓN.

MICROORGANISMO	METAL	ABSORCIÓN BIOLÓGICA (% EN PESO SECO)
Bacterias		
Citrobácter	Pb	35
	Cd	70
Zooglea	U	900
	Co	25
	Cu	34
	Ni	13
Bacillus cereus	Cd	7
Thiobacillus ferrooxidans	Ag	25
Algas		
Chlorella vulgaris	Au	10
Chlorella regularis	U	15
	Mn	0.8
Hongos		
Rhizopus arrhizus	Cu	1.6
	Cd	3
	Pb	10.4
	U	19.5
	Th	18.5
	Ag	5.4
	Hg	5.8
Aspergillus niger	Th	18.5
	U	21.5
Penicillium	U	12
	Th	11.6
	Zn	0.5

3.3.4 Ecuaciones de traslado

El estudio matemático del traslado de contaminantes se puede obtener por medio de las siguientes ecuaciones. En la figura 3.6 se muestra el volumen de control bidimensional.

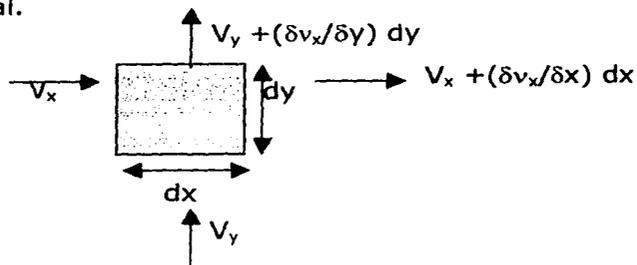


Fig. 3.6 Volumen de control bidimensional

Los flujos de Darcy hacia el interior del volumen en las direcciones x e y son respectivamente v_x y v_y mientras que las dimensiones del elemento son dx y dy . Suponiendo que no se dan volumen de control, la ecuación de continuidad indica que:

$$q_{in} = q_{out} \quad (3.3.2)$$

En donde:

q_{in} = flujo de penetración en el volumen de control

q_{out} = flujo de salida del volumen de control

El flujo volumétrico equivale al flujo de Darcy por el área de flujo:

$$q_{in} = V_{in} A \quad (3.3.3)$$

q_{in} = flujo volumétrico de penetración en el volumen de control (cm^3/s)

V_{in} = flujo de penetración en el volumen de control (cm/s)

A = área de flujo (cm^2)

Por lo tanto el flujo de penetración en el volumen de control será:

$$q_{in} = v_x dy + v_y dx \quad (3.3.4)$$

Mientras que el flujo de salida del volumen de control será:

$$q_{out} = (v_x + \left(\frac{\delta v_x}{\delta x}\right) dx) dy + (v_y + \left(\frac{\delta v_y}{\delta y}\right) dy) dx \quad (3.3.5)$$

en donde:

$\frac{\delta v_x}{\delta x}$ = cambio de flujo de Darcy en dirección x.

$\frac{\delta v_y}{\delta y}$ = cambio de flujo de Darcy en dirección y.

Cuando no se produzcan alteraciones globales en el control volumétrico, el volumen tanto de entrada como de salida será idéntico de acuerdo a la siguiente expresión:

$$0 = \left(\frac{\delta v_x}{\delta x}\right) dx dy + \left(\frac{\delta v_y}{\delta y}\right) dy dx \quad (3.3.6)$$

En cuerpos cuadrados con dimensiones unitarias ($dx=dy=1$) la ecuación anterior se reduce a:

$$0 = \frac{\delta v_x}{\delta x} + \frac{\delta v_y}{\delta y} \quad (3.3.7)$$

Con relación al flujo existente en las direcciones x e y la ley de Darcy se reduce a:

$$v_x = k_x \left(\frac{\delta h}{\delta x}\right) \quad (3.3.8)$$

En donde:

k_x = conductividad hidráulica en la dirección x.

$$v_y = k_y \left(\frac{\delta h}{\delta y}\right) \quad (3.3.9)$$

En donde:

k_y = conductividad hidráulica en la dirección y.

Sustituyendo en la ecuación 3.3.7 se obtiene:

$$0 = k_x \left(\frac{\delta^2 h}{\delta x^2}\right) + k_y \left(\frac{\delta^2 h}{\delta y^2}\right) \quad (3.3.10)$$

El flujo isótropo $k_x = k_y$ la ecuación 3.3.10 en un campo bidimensional sería:

$$\frac{\delta^2 h}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta y^2} = 0 \quad (3.3.11)$$

Esta ecuación refleja el volumen de carga hidráulica existente en cualquier punto del campo de flujo bidimensional. Si el flujo es tridimensional la ecuación de Laplace se convertirá en:

$$\frac{\delta^2 h}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta z^2} = 0 \quad (3.3.12)$$

La carga hidráulica varía solamente en función de la porción de la posición en el campo de flujo, y no de la conductividad hidráulica en condiciones de flujo isótropo. Al aplicar la ecuación de Laplace se asume que el flujo es estable (no

se altera con el transcurso del tiempo). En condiciones de flujo inestable o discontinuo la ecuación de Laplace puede ser adaptada a condiciones de flujo inestable tridimensional en acuíferos cerrados saturados del siguiente modo:

$$\frac{\delta^2 h}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta z^2} = \frac{\rho g(\alpha + \eta\beta)}{k} * \left(\frac{\delta h}{\delta t}\right) \quad (3.3.13)$$

En donde:

- x, y, z = posición en el sistema de flujo
- h = carga hidráulica (cm)
- ρ = densidad del agua (g/cm³)
- g = aceleración gravitacional (cm/seg²)
- α = compresibilidad del acuífero (cm²/N)
- η = porosidad del acuífero (adimensional)
- β = compresibilidad del agua (cm²/N)
- k = conductividad hidráulica (cm/seg.)
- t = tiempo (seg.)

En condiciones discontinuas la ecuación de Laplace revela que la carga se encuentra en función de cuatro valores variables (x, y, z y t) y de seis constantes (ρ , g, η , k, α , β).

La ecuación de Laplace para flujos inestables horizontales en acuíferos libres saturados es:

$$\frac{\delta^2 h}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta z^2} = \frac{S}{T} * \left(\frac{\delta h}{\delta t}\right) \quad (3.3.14)$$

En donde:

- x, y, z = posición en el sistema de flujo
- h = carga hidráulica (cm)
- S = almacenamiento del acuífero (g/seg.)
- T = transmisividad del acuífero (cm²/seg)
- t = tiempo (seg.)

3.4 CÁLCULO DE LA GENERACIÓN DE LIXIVIADOS

Existen varios procedimientos para el cálculo de la generación de lixiviados, estos se clasifican en analíticos e informáticos, de estos últimos la Agencia de Protección Ambiental (EPA), de Estados Unidos, a desarrollado un programa de computo junto con una base de datos denominado *The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance* (HELP), que se usa como instrumento de diagnóstico para evaluar alternativas de ubicación de rellenos sanitarios, este procedimiento no se empleo en el presente trabajo, razón por la cual no se describe detalladamente. En los procedimientos analíticos se encontró el método propuesto por George Tchobanoglous en **Gestión Integral De**

Residuos Sólidos, del cual se tomo el ejemplo que se describirá a continuación:

Se calculará la cantidad anual de lixiviados producidos por un relleno sanitario, considerando que una primera etapa se va a estar en operación cinco años y seis en una segunda etapa. Los cálculos deberán continuar hasta que relleno sanitario alcance un equilibrio; es decir, la cantidad de agua que entra al relleno se igualará a la cantidad de agua que se lixivia fuera. Trazando una curva de producción anual de lixiviados para el relleno. Para simplificar los cálculos, se determinará la cantidad de lixiviados producidos para un área superficial de 1 m^2 , después convirtiendo la solución para tener en cuenta la cantidad total de residuos colocados en el relleno.

Para el calculo de los lixiviados se tomará en cuenta las características de los residuos sólidos como son: peso específico, contenido de humedad, cantidad depositada en el relleno, días de operación del mismo. Así como las características del relleno sanitario como son: la altura del nivel, la relación de proporcionalidad de residuos sólidos y la cobertura, el número de niveles, el material de cubierta (peso específico e humedad), la producción gas y su capacidad de campo. También se necesita saber la cantidad de lluvia la cual variará de acuerdo al paso del tiempo de operación del relleno.

En la primera etapa se definen los elementos del balance de agua para el primer nivel, el cual consiste en la determinación del peso del material de cubierta y de los residuos sólidos en cada nivel; el peso seco de los residuos sólidos, el contenido de humedad de los mismos, el peso de la lluvia durante cada uno de los primeros 5 años. Obteniendo así el total del nivel. Se determina el balance de agua para el nivel 1 al final del primer año y se calcula la cantidad de lixiviados, así como la cantidad y peso de gas producido, el agua consumida con la producción de este, el peso de vapor de agua presente en el gas; el peso del agua en los residuos sólidos en el nivel 1, así como el peso seco de los residuos sólidos restantes en el nivel 1 al final del primer año. También se determina el peso medio sobre los residuos sólidos colocados en el nivel 1, así como el factor de capacidad de campo, la cantidad de agua que puede retener los residuos sólidos en el nivel 1, determinando así la cantidad de lixiviados producidos, se calcula la cantidad de agua restante en el nivel al final del primer año y para terminar se calcula el peso total del nivel 1 al final del primer año. Este proceso se sigue en los niveles siguientes (2,3,4,5), siempre tomando en cuenta el peso del nivel anterior.

En la segunda etapa la cual se realizará a partir de sexto año en donde se calcula el peso de la lluvia empezando con dicho año, se determinará la cantidad de lixiviados emitidos en el nivel 1; considerándose cada nivel para cada año. El cual consiste en calcular la cantidad y peso de gas producida por el nivel 5 al final del sexto año. Se determina el peso del agua consumida en la producción del gas, así como del vapor de la misma, se calculará el peso del agua en los residuos sólidos en el nivel 5, al igual que el peso seco de los residuos sólidos restantes en el nivel 5, así como el peso medio sobre los

residuos depositados en el nivel 5, se calcula el factor de capacidad de campo, la cantidad de agua que puede retener los residuos sólidos en el nivel 5, así como la cantidad de lixiviados formados, determinando la cantidad de agua restante en el nivel 5 al final del año 6. Teniendo como resultado el peso total del nivel 5 al final del año 6; se hace el mismo calculo para los niveles 4,3,2 y 1. Por último, se estima la cantidad total de lixiviados en los once años.

Datos.

1. Cantidades de residuos.

- a) Residuos colocados por día = 1000 ton.
- b) Número de días en operación = 300
- c) Residuos colocados por año = 3×10^5 ton.

2. Características de los residuos.

- a) Peso específico compactado de los residuos = 590 kg/m^3 .
- b) Contenido de humedad inicial de los residuos = 20% en masa.

3. Características del relleno sanitario.

a) Generales.

- i) Altura de nivel = 3 m.
- ii) Relación residuo/cubierta = 5/1 en volumen.
- iii) Número de niveles = 5 (correspondiendo uno a cada año).

b) Material de cubierta.

- i) Peso específico = 1770 kg/m^3 (incluyendo humedad)
- ii) Se supone que el contenido en humedad del suelo es su capacidad de campo.

c) Producción de gas.

- i) Producción de gas: se utilizarán los siguientes datos de producción de gas para estimar la cantidad total de gas producido por Kg de residuos totales colocados en cada nivel.

TABLA 3.8 PRODUCCIÓN DE GAS.

PRODUCCIÓN DE GAS, m ³ /kg			
FINAL DEL AÑO	DESCOMPOSICIÓN RÁPIDA	DESCOMPOSICIÓN LENTA	TOTAL
1	0.000	0.000	0.000
2	0.059	0.000	0.059
3	0.103	0.001	0.104
4	0.073	0.002	0.076
5	0.044	0.003	0.047
6	0.015	0.004	0.019
7	0.000	0.005	0.005
8	0.000	0.004	0.004
9	0.000	0.004	0.004
10	0.000	0.003	0.003
11	0.000	0.002	0.002
12	0.000	0.002	0.002
13	0.000	0.001	0.001
14	0.000	0.001	0.001
15	0.000	0.001	0.001
16	0.000	0.001	0.001
17	0.000	0.000	0.000
TOTAL	0.294	0.034	0.329

- ii) El agua consumida en la formación de gas del relleno = 0.160 kg/m³ del gas producido
 iii) El agua presente como vapor de agua en el gas del relleno = 0.016 kg/m³ del gas producido
 iv) Peso específico de gas del relleno = 1.339 kg/m³

d) Capacidad de campo.

La capacidad de campo en función del peso de sobrecarga se expresa como:

$$FC = 0.6 - 0.55 \left(\frac{w}{4536 + w} \right) \quad (3.4.1)$$

Donde:

FC = la fracción de agua en los residuos basándose en su peso seco.

W = el peso de sobrecarga calculado a una altura media de los residuos en el nivel en cuestión. Kg

4. Cantidad de lluvia.

- a) La lluvia que entra en la cubierta diaria durante los primeros cinco años de operación = 10 cm/año.
 b) La lluvia que entra en la cubierta final después de cinco años = 2.5 cm/año.

Solución. Parte 1.

1. Definición de los elementos del balance de agua para el primer nivel. La figura 3.7 se muestra el arreglo de estos.

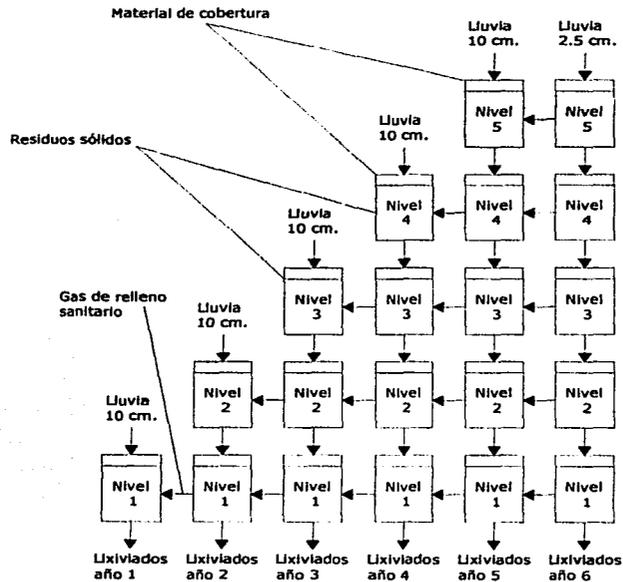


Fig. 3.7 Arreglo del balance de agua.

a) Determinación del peso del material de cubierta y de los residuos sólidos en cada nivel.

$$\text{Peso del material de cubierta} = [1770 \text{ kg/m}^3 \times (3\text{m} \times 1/6) \times 1 \text{ m}^2] = 885 \text{ kg}$$

$$\text{Peso de residuos sólidos} = [590 \text{ kg/m}^3 \times (3 \text{ m} \times 5/6) \times 1 \text{ m}^2] = 1475 \text{ kg}$$

$$\text{Peso total de nivel} = (885+1475) \text{ kg} = 2360 \text{ kg}$$

b) Peso seco de residuos sólidos = 1475 kg X 0.80 = 1180 kg

c) Contenido en humedad de residuos sólidos = 1475 kg X 0.20 = 295 kg

d) El peso de la lluvia entrando en el relleno durante cada uno de los primeros cinco años.

$$\text{Peso de la lluvia} = [(10 \text{ cm} \times 1\text{m}/100 \text{ cm}) \times 1 \text{ m}^2 \times 999 \text{ kg/m}^3] = 99.99 \text{ kg}$$

$$\text{e) Peso total del nivel} = 1475 \text{ kg} + 885 \text{ kg} + 99.99 \text{ kg} = 2459.99 \text{ kg}$$

2. Se prepara un balance de agua para el nivel 1 al final del año 1 y se determina la cantidad de lixiviado que se puede esperar del nivel 1. (ver fig. 3.7).

a) Determinación de la cantidad y el peso de gas producido del nivel 1 durante el año 1. Hay que resaltar que la producción de gas no comienza hasta el final del año 1. Es decir, se supone que no se produce gas durante el primer año

$$\begin{aligned}\text{Gas producido} &= 1475 \text{ kg} \times 0 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ de residuos depositados en el nivel 1.} \\ &= 0.0 \text{ m}^3\end{aligned}$$

$$\text{Peso del gas producido} = 0.0 \text{ m}^3 \times 1.339 \text{ kg/m}^3 = 0.0 \text{ kg}$$

b) Determinación del peso del agua consumida en la producción del gas del relleno sanitario.

$$\text{Peso del agua consumida} = 0.0 \text{ m}^3 \times 0.16 \text{ kg/m}^3 = 0.0 \text{ kg}$$

c) Determinación del peso del vapor de agua presente en el gas.

$$\text{Peso de vapor de agua} = 0.0 \text{ m}^3 \times 0.016 \text{ kg/m}^3 = 0.0 \text{ kg}$$

d) Determinación del peso del agua en los residuos sólidos en el nivel 1.

$$\text{Peso del agua} = 295 \text{ kg} + 99.99 \text{ kg (de la lluvia)} = 349.99 \text{ kg}$$

e) Determinación del peso seco de los residuos sólidos restantes en el nivel 1 al final del año 1.

$$\text{Peso seco de residuos sólidos} = 1180 \text{ kg} - [0.0 \text{ kg (gas del relleno)} - 0.0 \text{ kg (agua consumida en la reacción de conversión)}] = 1180 \text{ kg}$$

f) Determinación del peso medio sobre los residuos colocados en el nivel 1 (el peso medio en el nivel 1 se producirá en el punto medio de los residuos en el nivel 1).

$$\text{Peso medio} = 0.5 \times (1180 \text{ kg} + 349.99 \text{ kg}) + 885 \text{ kg} = 1672.49 \text{ kg}$$

g) Determinación del factor de capacidad de campo.

$$\text{FC} = 0.6 - [0.55 \times (1672.49 / (4536 + 1672.49))] = 0.452$$

h) Determinación de la cantidad de agua que puede retenerse en los residuos sólidos

$$\begin{aligned}\text{Agua retenida en los residuos sólidos en el nivel 1} &= 0.452 \times 1180 \text{ Kg} \\ &= 533.36 \text{ kg}\end{aligned}$$

i) Determinación de la cantidad de lixiviados producidos.

Lixiviados producidos = agua real en residuos sólidos - capacidad de campo de los residuos sólidos.

$$\text{Lixiviados producidos} = (349.99 - 533.36) \text{ kg} = -138.37 \text{ kg}$$

Como la capacidad de campo de los residuos es mayor que la cantidad real de agua presente en los residuos, no se producirán lixiviados.

j) Determinación de la cantidad de agua restante en el nivel 1 al final del año 1.

$$\text{Agua restante} = 349.99 \text{ kg} - 0 = 349.99 \text{ kg}$$

k) Determinar el peso total del nivel 1 al final del año 1.

$$\begin{aligned} \text{Peso total del nivel} &= \text{residuos secos} + \text{agua restante} + \text{cubierta.} \\ &= 1180 \text{ kg} + 349.99 \text{ kg} + 885 \text{ kg} = 2459.99 \text{ Kg} \end{aligned}$$

3. Se prepara un balance de agua para los niveles 1 y 2 al final del año 2 y se determina la cantidad de lixiviados que pueden esperarse del primer nivel. Los cálculos para el nivel 2 en el año 2 = los cálculos para el nivel 1 en el año 1. (fig.3.7)

a) Determinación la cantidad y el peso de gas producido del nivel 1 durante el año 2.

$$\begin{aligned} \text{Gas producido} &= 1475 \text{ kg} \times 0.059 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ de residuos depositados en el nivel 1.} \\ &= 87.387 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Peso del gas producido} = 87.387 \text{ m}^3 \times 1.339 \text{ kg/m}^3 = 117 \text{ kg}$$

b) Determinación del peso del agua consumida en la producción del gas del relleno sanitario. Se resalta que el peso de los residuos sólidos consumidos en la reacción está incluido en el peso del gas determinado anteriormente.

$$\text{Peso del agua consumida} = 87.387 \text{ m}^3 \times 0.16 \text{ kg/m}^3 = 13.998 \text{ kg}$$

c) Determinación del peso del vapor de agua presente en el gas.

$$\text{Peso de vapor de agua} = 87.387 \text{ m}^3 \times 0.016 \text{ kg/m}^3 = 1.398 \text{ kg}$$

d) Determinación del peso del agua en los residuos sólidos en el nivel 1 al final del año 2.

$$\text{Peso del agua} = 394.99 \text{ kg} - 13.998 \text{ kg} - 1.398 \text{ kg} = 379.594 \text{ kg}$$

e) Determinación del peso seco de los residuos sólidos restantes en el nivel 1 al final del año 2.

Peso seco de residuos sólidos = 1180 kg - [117 kg - 13.998 kg] = 1076.998 kg

f) Determinación del peso medio sobre los residuos colocados en el nivel 1

Peso medio = 2459.99(nivel 2) + 0.5 X (1076.998 kg + 379.594 kg) + 885 kg
= 4073.29 kg

g) Determinación del factor de capacidad de campo.

FC = 0.6 - [0.55 X (4073.29 / (4536 + 4073.29))] = 0.360

h) Determinación de la cantidad de agua que puede retenerse en los residuos sólidos

Agua retenida en los residuos sólidos en el nivel 1 = 0.360 X 1076.998 Kg
= 387.72 kg

i) Determinación de la cantidad de lixiviados producidos.

Lixiviados producidos = (379.594 - 387.72) kg = - 8.125 kg

Como la capacidad de campo de los residuos es mayor que la cantidad real de agua presente en los residuos, no se producirán lixiviados.

j) Determinación de la cantidad de agua restante en el nivel 1 al final del año 1.

Agua restante = 379.99 kg - 0 = 379.99 kg

k) Determinación del peso total del nivel 1 al final del año 2.

Peso total del nivel = residuos secos + agua restante + cubierta.
= 1076.998 kg + 379.594 kg + 885 kg = 2341.592 Kg

4. Se prepara un balance de agua para los niveles 1, 2 y 3 al final del año 3 y se determina la cantidad de lixiviados que pueden esperarse del primer nivel. Se resalta que el nivel 3 = nivel 2 y nivel 2 = nivel 1 en el año 2 (fig. 3.7)

a) Determinación la cantidad y el peso de gas producido del nivel 1 al final del año 3.

Gas producido = 1495 kg X 0.010 m³/kg de residuos depositados en el nivel 1.
= 153.78 m³

Peso del gas producido = 153.78 m³ X 1.339 kg/m³ = 205.91 kg

b) Determinación del peso del agua consumida en la producción del gas del relleno sanitario. Se resalta que el peso de los residuos sólidos consumidos en la reacción está incluido en el peso del gas determinado anteriormente.

$$\text{Peso del agua consumida} = 153.78 \text{ m}^3 \times 0.16 \text{ kg/m}^3 = 24.61 \text{ kg}$$

c) Determinación del peso del vapor de agua presente en el gas.

$$\text{Peso de vapor de agua} = 153.78 \text{ m}^3 \times 0.016 \text{ kg/m}^3 = 2.46 \text{ kg}$$

d) Determinación del peso del agua en los residuos sólidos en el nivel 1 al final del año 3.

$$\text{Peso del agua} = 379.594 \text{ kg} - 24.61 \text{ kg} - 2.46 \text{ kg} = 352.534 \text{ kg}$$

e) Determinación del peso seco de los residuos sólidos restantes en el nivel 1 al final del año 3.

$$\text{Peso seco de residuos sólidos} = 1076 \text{ kg} - [205.91 \text{ kg} - 24.61 \text{ kg}] = 895.698 \text{ kg}$$

f) Determinación del peso medio sobre los residuos colocados en el nivel 1

$$\text{Peso medio} = 2459.99 \text{ (nivel 3)} + 2341.592 \text{ kg (nivel 2)} + 95 \times (895.698 \text{ kg} + 352.534 \text{ kg}) + 885 \text{ kg} = 6310.69 \text{ kg}$$

g) Determinación del factor de capacidad de campo.

$$\text{FC} = 0.6 - [0.55 \times (6310.69 / (4536 + 6310.69))] = 0.28$$

h) Determinación de la cantidad de agua que puede retenerse en los residuos sólidos

$$\begin{aligned} \text{Agua retenida en los residuos sólidos en el nivel 1} &= 0.28 \times 895.698 \text{ Kg} \\ &= 250.79 \text{ kg} \end{aligned}$$

i) Determinación de la cantidad de lixiviados producidos.

$$\text{Lixiviados producidos} = (352.534 - 250.79) \text{ kg} = 101.739 \text{ kg}$$

Como la capacidad de campo de los residuos es menor que la cantidad real de agua presente en los residuos, se producirán lixiviados.

j) Determinación de la cantidad de agua restante en el nivel 1 al final del año 3.

$$\text{Agua restante} = 352.534 \text{ kg} - 101.739 = 250.79 \text{ kg}$$

k) Determinación del peso total del nivel 1 al final del año 3.

$$\begin{aligned} \text{Peso total del nivel} &= \text{residuos secos} + \text{agua restante} + \text{cubierta.} \\ &= 895.698 \text{ kg} + 250.79 \text{ kg} + 885 \text{ kg} = 1221.488 \text{ Kg} \end{aligned}$$

5. Se prepara un balance de agua para los niveles 1, 2, 3 y 4 al final del año 4 y se determina la cantidad de lixiviados que pueden esperarse del primer nivel. Se resalta que el nivel 4 = nivel 3 y nivel 3 = nivel 2, el nivel 2 = nivel 1 en el año 3. También que la cantidad de agua desechada del nivel 3 al nivel 4 es de 101.739 kg (fig. 3.7)

a) Determinación la cantidad y el peso de gas producido del nivel 1 al final del año 4.

$$\text{Gas producido} = 1475 \text{ kg} \times 0.076 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ de residuos depositados en el nivel 1.} \\ = 111.882 \text{ m}^3$$

$$\text{Peso del gas producido} = 111.882 \text{ m}^3 \times 1.339 \text{ kg/m}^3 = 149.81 \text{ kg}$$

b) Determinación del peso del agua consumida en la producción del gas del relleno sanitario. Se resalta que el peso de los residuos sólidos consumidos en la reacción está incluido en el peso del gas determinado anteriormente.

$$\text{Peso del agua consumida} = 111.882 \text{ m}^3 \times 0.16 \text{ kg/m}^3 = 17.92 \text{ kg}$$

c) Determinación del peso del vapor de agua presente en el gas.

$$\text{Peso de vapor de agua} = 111.882 \text{ m}^3 \times 0.016 \text{ kg/m}^3 = 1.792 \text{ kg}$$

d) Determinación del peso del agua en los residuos sólidos en el nivel 1 al final del año 4. La cantidad inicial de agua restante en el nivel 1 es igual a la capacidad de campo de 250.79 kg

$$\text{Peso del agua} = (250.79 \text{ kg} - 17.92 \text{ kg} - 1.792 \text{ kg}) + 101.739 \text{ kg (lixiviados del nivel 3)} = 332.817 \text{ kg}$$

e) Determinación del peso seco de los residuos sólidos restantes en el nivel 1 al final del año 4.

$$\text{Peso seco de residuos sólidos} = 895.698 \text{ kg} - 149.81 \text{ kg} - 17.92 \text{ kg} = 763.81 \text{ kg}$$

f) Determinación del peso medio sobre los residuos colocados en el nivel 1

$$\text{Peso medio} = 2459.99 \text{ (nivel 4)} + 2341.592 \text{ kg (nivel 3)} + 1221.49 \text{ kg (nivel 2)} \\ + 0.5 \times (763.81 \text{ kg} + 332.817 \text{ kg}) + 885 \text{ kg} = 7456.38 \text{ kg}$$

g) Determinación del factor de capacidad de campo.

$$\text{FC} = 0.6 - [0.55 \times (7456.38 / (4536 + 7456.38))] = 0.25$$

h) Determinación de la cantidad de agua que puede retenerse en los residuos sólidos

$$\text{Agua retenida en los residuos sólidos en el nivel 1} = 0.25 \times 763.81 \text{ Kg} \\ = 190.95 \text{ kg}$$

i) Determinación de la cantidad de lixiviados producidos.

$$\text{Lixiviados producidos} = (332.817 - 190.95) \text{ kg} = 141.86 \text{ kg}$$

Como la capacidad de campo de los residuos es menor que la cantidad real de agua presente en los residuos, se producirán lixiviados.

j) Determinación de la cantidad de agua restante en el nivel 1 al final del año 4.

$$\text{Agua restante} = 332.817 \text{ kg} - 141.86 = 190.95 \text{ kg}$$

k) Determinación del peso total del nivel 1 al final del año 4.

$$\begin{aligned} \text{Peso total del nivel} &= \text{residuos secos} + \text{agua restante} + \text{cubierta.} \\ &= 736.81 \text{ kg} + 190.95 \text{ kg} + 885 \text{ kg} = 1839.76 \text{ Kg} \end{aligned}$$

6. Se prepara un balance de agua para los niveles 1, 2, 3, 4 y 5 al final del año 5 y se determina la cantidad de lixiviados que pueden esperarse del primer nivel. Se resalta que el nivel 5 = nivel 4 y nivel 4 = nivel 3, el nivel 3 = nivel 2, el nivel 2 = nivel 1, en el año 4. También que la cantidad de agua desechada del nivel 3 al nivel 2 es de 141.86 kg y del nivel 2 al nivel 1 es de 101.74 kg (fig. 3.7)

a) Determinación la cantidad y el peso de gas producido del nivel 1 al final del año 5.

$$\begin{aligned} \text{Gas producido} &= 1495 \text{ kg} \times 0.047 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ de residuos depositados en el nivel 1.} \\ &= 69.98 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Peso del gas producido} = 69.98 \text{ m}^3 \times 1.339 \text{ kg/m}^3 = 93.70 \text{ kg}$$

b) Determinación del peso del agua consumida en la producción del gas del relleno sanitario. Se resalta que el peso de los residuos sólidos consumidos en la reacción está incluido en el peso del gas determinado anteriormente.

$$\text{Peso del agua consumida} = 69.98 \text{ m}^3 \times 0.16 \text{ kg/m}^3 = 11.21 \text{ kg}$$

c) Determinación del peso del vapor de agua presente en el gas.

$$\text{Peso de vapor de agua} = 69.98 \text{ m}^3 \times 0.016 \text{ kg/m}^3 = 1.121 \text{ kg}$$

d) Determinación del peso del agua en los residuos sólidos en el nivel 1. La cantidad inicial de agua restante en el nivel 1 es igual a la capacidad de campo de 190.95 kg

$$\text{Peso del agua} = (190.95 \text{ kg} - 11.21 \text{ kg} - 1.121 \text{ kg}) + 141.86 \text{ kg (lixiviados del nivel 2)} = 320.48 \text{ kg}$$

e) Determinación del peso seco de los residuos sólidos restantes en el nivel 1 al final del año 5.

$$\text{Peso seco de residuos sólidos} = 763.81 \text{ kg} - 93.70 \text{ kg} - 11.21 \text{ kg} = 681.32 \text{ kg}$$

f) Determinación del peso medio sobre los residuos colocados en el nivel 1

$$\text{Peso medio} = 2459.99 \text{ (nivel 5)} + 2341.592 \text{ kg (nivel 4)} + 1221.49 \text{ kg (nivel 3)} + 1839.76 \text{ (nivel 2)} + [0.5 \times (681.32 \text{ kg} + 320.48 \text{ kg}) + 885 \text{ kg}] = 9248.73 \text{ kg}$$

g) Determinación del factor de capacidad de campo.

$$\text{FC} = 0.6 - [0.55 \times (9248.73 / (4536 + 9248.73))] = 0.23$$

h) Determinación de la cantidad de agua que puede retenerse en los residuos sólidos

$$\text{Agua retenida en los residuos sólidos en el nivel 1} = 0.23 \times 681.32 \text{ Kg} = 156.70 \text{ kg}$$

i) Determinación de la cantidad de lixiviados producidos.

$$\text{Lixiviados producidos} = (320.48 - 156.70) \text{ kg} = 163.78 \text{ kg}$$

Como la capacidad de campo de los residuos es menor que la cantidad real de agua presente en los residuos, se producirán lixiviados.

j) Determinación de la cantidad de agua restante en el nivel 1 al final del año 5.

$$\text{Agua restante} = 320.48 \text{ kg} - 163.78 = 156.70 \text{ kg}$$

k) Determinación del peso total del nivel 1 al final del año 5.

$$\text{Peso total del nivel} = \text{residuos secos} + \text{agua restante} + \text{cubierta} = 681.32 \text{ kg} + 156.70 \text{ kg} + 885 \text{ kg} = 1723.02 \text{ Kg}$$

Solución. Parte 2

Para el año 6 y los años siguientes.

El peso del agua de la lluvia que entra en el relleno sanitario empezando con el año 6 es:

$$\text{Peso del agua de lluvia} = [25 \text{ cm} / (100 \text{ cm/m})] \times 1 \text{ m}^2 \times 999.52 \text{ kg/m}^3 = 24.99 \text{ kg}$$

Cuando se determina los lixiviados emitidos del nivel 1, debe considerarse cada nivel para cada año.

1. Determinación de los lixiviados del nivel 5 en el año 6.

a) Determinación de la cantidad y el peso de gas producido por el nivel 5 al final del año 6.

$$\begin{aligned} \text{Gas producido} &= 1475 \text{ kg} \times 0.059 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ de residuos depositados en el nivel 5.} \\ &= 87.03 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Peso del gas producido} = 87.03 \text{ m}^3 \times 1.339 \text{ kg/m}^3 = 116.53 \text{ kg}$$

b) Determinación del peso del agua consumida en la producción del gas del relleno sanitario. Se resalta que el peso de los residuos sólidos consumidos en la reacción está incluido en el peso del gas determinado anteriormente.

$$\text{Peso del agua consumida} = 87.03 \text{ m}^3 \times 0.16 \text{ kg/m}^3 = 13.92 \text{ kg}$$

c) Determinación del peso del vapor de agua presente en el gas.

$$\text{Peso de vapor de agua} = 87.03 \text{ m}^3 \times 0.016 \text{ kg/m}^3 = 1.392 \text{ kg}$$

d) Determinación del peso del agua en los residuos sólidos en el nivel 5. Los cálculos para el nivel 5 en el año 5 corresponden con los cálculos para el nivel 1 en el año 1.

$$\text{Peso del agua} = (394.99 \text{ kg} - 13.92 \text{ kg} + 24.99 \text{ kg})(\text{de la lluvia}) = 404.67 \text{ kg}$$

e) Determinación del peso seco de los residuos sólidos restantes en el nivel 5.

$$\text{Peso seco de residuos sólidos} = 1180 \text{ kg} - 116.53 \text{ kg} - 13.92 \text{ kg} = 1077.39 \text{ kg}$$

f) Determinación del peso medio sobre los residuos colocados en el nivel 5.

$$\text{Peso medio} = [0.5 \times (1077.39 \text{ kg} + 404.67 \text{ kg}) + 885 \text{ kg}] = 1626 \text{ kg}$$

g) Determinación del factor de capacidad de campo.

$$\text{FC} = 0.6 - [0.55 \times (1626 / (4536 + 1626))] = 0.455$$

h) Determinación de la cantidad de agua que puede retenerse en los residuos sólidos

$$\begin{aligned} \text{Agua retenida en los residuos sólidos en el nivel 5} &= 0.455 \times 1077.39 \text{ Kg} \\ &= 490.07 \text{ kg} \end{aligned}$$

i) Determinación de la cantidad de lixiviados formados.

$$\text{Lixiviados formados} = (404.67 - 490.07) \text{ kg} = -85.40 \text{ kg}$$

Como la capacidad de campo de los residuos es mayor que la cantidad real de agua presente en los residuos, no se formarán lixiviados.

j) Determinación de la cantidad de agua restante en el nivel 5 al final del año 6.

$$\text{Agua restante} = 404.67 \text{ kg} - 0.0 = 404.67 \text{ kg}$$

k) Determinación del peso total del nivel 5 al final del año 6.

$$\begin{aligned} \text{Peso total del nivel} &= \text{residuos secos} + \text{agua restante} + \text{cubierta.} \\ &= 1077.39 \text{ kg} + 404.67 \text{ kg} + 885 \text{ kg} = 2367.06 \text{ Kg} \end{aligned}$$

2. Determinación de los lixiviados del nivel 4 en el año 6.

a) Determinación de la cantidad y el peso de gas producido por el nivel 4 al final del año 6.

$$\begin{aligned} \text{Gas producido} &= 1475 \text{ kg} \times 0.104 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ de residuos depositados en el nivel 4.} \\ &= 153.78 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Peso del gas producido} = 153.78 \text{ m}^3 \times 1.339 \text{ kg/m}^3 = 205.91 \text{ kg}$$

b) Determinación del peso del agua consumida en la producción del gas del relleno sanitario.

$$\text{Peso del agua consumida} = 153.78 \text{ m}^3 \times 0.16 \text{ kg/m}^3 = 24.60 \text{ kg}$$

c) Determinación del peso del vapor de agua presente en el gas.

$$\text{Peso de vapor de agua} = 153.78 \text{ m}^3 \times 0.016 \text{ kg/m}^3 = 2.46 \text{ kg}$$

d) Determinación del peso del agua en los residuos sólidos en el nivel 4.

$$\text{Peso del agua} = (379.59 \text{ kg} - 24.60 \text{ kg} - 2.46 \text{ kg}) = 352.53 \text{ kg}$$

e) Determinación del peso seco de los residuos sólidos restantes en el nivel 4.

$$\text{Peso seco de residuos sólidos} = 1076.998 \text{ kg} - 205.9 \text{ kg} - 24.6 \text{ kg} = 895.69 \text{ kg}$$

f) Determinación del peso medio sobre los residuos colocados en el nivel 4.

$$\begin{aligned} \text{Peso medio} &= 2367.06 \text{ kg} + [0.5 \times (895.69 \text{ kg} + 352.53 \text{ kg}) + 885 \text{ kg}] \\ &= 3876.17 \text{ kg} \end{aligned}$$

g) Determinación del factor de capacidad de campo.

$$\text{FC} = 0.6 - [0.55 \times (3876.17 / (4536 + 3876.17))] = 0.347$$

h) Determinación de la cantidad de agua que puede retenerse en los residuos sólidos

$$\begin{aligned}\text{Agua retenida en los residuos sólidos en el nivel 4} &= 0.347 \times 895.69 \text{ Kg} \\ &= 310.42 \text{ kg}\end{aligned}$$

i) Determinación de la cantidad de lixiviados formados.

$$\text{Lixiviados formados} = (352.53 - 310.42) \text{ kg} = 42.11 \text{ kg}$$

Como la capacidad de campo de los residuos es menor que la cantidad real de agua presente en los residuos, se formarán lixiviados.

j) Determinación de la cantidad de agua restante en el nivel 4 al final del año 6.

$$\text{Agua restante} = 352.53 \text{ kg} - 42.11 \text{ kg} = 310.42 \text{ kg}$$

k) Determinación del peso total del nivel 4 al final del año 6.

$$\begin{aligned}\text{Peso total del nivel} &= \text{residuos secos} + \text{agua restante} + \text{cubierta.} \\ &= 895.69 \text{ kg} + 310.42 \text{ kg} + 885 \text{ kg} = 2091.11 \text{ Kg}\end{aligned}$$

3. Determinación de los lixiviados del nivel 3 en el año 6.

a) Determinación de la cantidad y el peso de gas producido por el nivel 3 al final del año 6.

$$\begin{aligned}\text{Gas producido} &= 1475 \text{ kg} \times 0.076 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ de residuos depositados en el nivel 3.} \\ &= 112.1 \text{ m}^3\end{aligned}$$

$$\text{Peso del gas producido} = 112.1 \text{ m}^3 \times 1.339 \text{ kg/m}^3 = 17.94 \text{ kg}$$

b) Determinación del peso del agua consumida en la producción del gas del relleno sanitario.

$$\text{Peso del agua consumida} = 112.1 \text{ m}^3 \times 0.16 \text{ kg/m}^3 = 17.94 \text{ kg}$$

c) Determinación del peso del vapor de agua presente en el gas.

$$\text{Peso de vapor de agua} = 112.1 \text{ m}^3 \times 0.016 \text{ kg/m}^3 = 1.794 \text{ kg}$$

d) Determinación del peso del agua en los residuos sólidos en el nivel 3.

$$\text{Peso del agua} = (250.79 \text{ kg} - 17.94 \text{ kg} - 1.794 \text{ kg}) + 42.11 \text{ (lixiviados desde arriba)} = 273.17 \text{ kg}$$

e) Determinación del peso seco de los residuos sólidos restantes en el nivel 4.

Peso seco de residuos sólidos = $895.69 \text{ kg} - 150.10 \text{ kg} - 17.94 \text{ kg} = 727.65 \text{ kg}$

f) Determinación del peso medio sobre los residuos colocados en el nivel 3.
Peso medio = $2367.06 \text{ kg (nivel 5)} + 2091.11 \text{ kg (nivel 4)} + [0.5 \times (727.65 \text{ kg} + 273.17 \text{ kg}) + 885 \text{ kg}] = 5843.58 \text{ kg}$

g) Determinación del factor de capacidad de campo.

$$FC = 0.6 - [0.55 \times (5843.58 / (4536 + 5843.58))] = 0.29$$

h) Determinación de la cantidad de agua que puede retenerse en los residuos sólidos

$$\begin{aligned} \text{Agua retenida en los residuos sólidos en el nivel 3} &= 0.29 \times 727.65 \text{ Kg} \\ &= 211.28 \text{ kg} \end{aligned}$$

i) Determinación de la cantidad de lixiviados formados.

$$\text{Lixiviados formados} = (273.17 - 211.28) \text{ kg} = 61.89 \text{ kg}$$

Como la capacidad de campo de los residuos es menor que la cantidad real de agua presente en los residuos, se formarán lixiviados.

j) Determinación de la cantidad de agua restante en el nivel 3 al final del año 6.

$$\text{Agua restante} = 273.17 \text{ kg} - 61.89 \text{ kg} = 211.28 \text{ kg}$$

k) Determinación del peso total del nivel 3 al final del año 6.

$$\begin{aligned} \text{Peso total del nivel} &= \text{residuos secos} + \text{agua restante} + \text{cubierta.} \\ &= 727.65 \text{ kg} + 211.28 \text{ kg} + 885 \text{ kg} = 1823.93 \text{ Kg} \end{aligned}$$

4. Determinación de los lixiviados del nivel 2 en el año 6.

a) Determinación de la cantidad y el peso de gas producido por el nivel 2 al final del año 6.

$$\begin{aligned} \text{Gas producido} &= 1475 \text{ kg} \times 0.047 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ de residuos depositados en el nivel 2.} \\ &= 69.33 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Peso del gas producido} = 69.33 \text{ m}^3 \times 1.339 \text{ kg/m}^3 = 92.83 \text{ kg}$$

b) Determinación del peso del agua consumida en la producción del gas del relleno sanitario.

$$\text{Peso del agua consumida} = 69.33 \text{ m}^3 \times 0.16 \text{ kg/m}^3 = 11.09 \text{ kg}$$

c) Determinación del peso del vapor de agua presente en el gas.

$$\text{Peso de vapor de agua} = 69.33 \text{ m}^3 \times 0.016 \text{ kg/m}^3 = 1.109 \text{ kg}$$

d) Determinación del peso del agua en los residuos sólidos en el nivel 2.

$$\text{Peso del agua} = (190.95 \text{ kg} - 11.09 \text{ kg} - 1.109 \text{ kg}) + 61.89 \text{ (lixiviados desde arriba)} = 240.64 \text{ kg}$$

e) Determinación del peso seco de los residuos sólidos restantes en el nivel 4.

$$\text{Peso seco de residuos sólidos} = 727.65 \text{ kg} - 92.83 \text{ kg} - 11.09 \text{ kg} = 645.91 \text{ kg}$$

f) Determinación del peso medio sobre los residuos colocados en el nivel 3.

$$\text{Peso medio} = 2367.06 \text{ kg (nivel 5)} + 2091.11 \text{ kg (nivel 4)} + 1823.93 \text{ kg (nivel 3)} + [0.5 \times (645.91 \text{ kg} + 240.64 \text{ kg}) + 885 \text{ kg}] = 7610.37 \text{ kg}$$

g) Determinación del factor de capacidad de campo.

$$FC = 0.6 - [0.55 \times (7610.37 / (4536 + 7610.37))] = 0.255$$

h) Determinación de la cantidad de agua que puede retenerse en los residuos sólidos

$$\text{Agua retenida en los residuos sólidos en el nivel 2} = 0.255 \times 645.91 \text{ Kg} = 164.96 \text{ kg}$$

i) Determinación de la cantidad de lixiviados formados.

$$\text{Lixiviados formados} = (240.64 - 164.96) \text{ kg} = 75.68 \text{ kg}$$

Como la capacidad de campo de los residuos es menor que la cantidad real de agua presente en los residuos, se formarán lixiviados.

j) Determinación de la cantidad de agua restante en el nivel 2 al final del año 6.

$$\text{Agua restante} = 240.64 \text{ kg} - 75.68 \text{ kg} = 164.96 \text{ kg}$$

k) Determinación del peso total del nivel 2 al final del año 6.

$$\text{Peso total del nivel} = \text{residuos secos} + \text{agua restante} + \text{cubierta} = 645.91 \text{ kg} + 240.64 \text{ kg} + 885 \text{ kg} = 1771.55 \text{ Kg}$$

5. Determinación de los lixiviados del nivel 2 en el año 6.

a) Determinación de la cantidad y el peso de gas producido por el nivel 1 al final del año 6.

$$\text{Gas producido} = 1475 \text{ kg} \times 0.019 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ de residuos depositados en el nivel 1.} \\ = 28.03 \text{ m}^3$$

$$\text{Peso del gas producido} = 28.03 \text{ m}^3 \times 1.339 \text{ kg/m}^3 = 37.53 \text{ kg}$$

b) Determinación del peso del agua consumida en la producción del gas del relleno sanitario.

$$\text{Peso del agua consumida} = 28.03 \text{ m}^3 \times 0.16 \text{ kg/m}^3 = 4.48 \text{ kg}$$

c) Determinación del peso del vapor de agua presente en el gas.

$$\text{Peso de vapor de agua} = 28.03 \text{ m}^3 \times 0.016 \text{ kg/m}^3 = 0.448 \text{ kg}$$

d) Determinación del peso del agua en los residuos sólidos en el nivel 3.

$$\text{Peso del agua} = (156.70 \text{ kg} - 4.48 \text{ kg} - 0.448 \text{ kg}) + 75.68 \text{ (lixiviados desde arriba)} = 227.45 \text{ kg}$$

e) Determinación del peso seco de los residuos sólidos restantes en el nivel 1.

$$\text{Peso seco de residuos sólidos} = 645.91 \text{ kg} - 28.03 \text{ kg} - 4.48 \text{ kg} = 622.36 \text{ kg}$$

f) Determinación del peso medio sobre los residuos colocados en el nivel 1.

$$\text{Peso medio} = 2367.06 \text{ kg (nivel 5)} + 2091.11 \text{ kg (nivel 4)} + 1823.93 \text{ kg (nivel 3)} + 1771.55 \text{ (nivel 2)} + [0.5 \times (622.36 \text{ kg} + 227.45 \text{ kg}) + 885 \text{ kg}] = 9363.56 \text{ kg}$$

g) Determinación del factor de capacidad de campo.

$$\text{FC} = 0.6 - [0.55 \times (9363.56 / (4536 + 9363.56))] = 0.229$$

h) Determinación de la cantidad de agua que puede retenerse en los residuos sólidos

$$\text{Agua retenida en los residuos sólidos en el nivel 1} = 0.229 \times 622.36 \text{ Kg} \\ = 142.82 \text{ kg}$$

i) Determinación de la cantidad de lixiviados formados.

$$\text{Lixiviados formados} = (227.45 - 142.82) \text{ kg} = 84.63 \text{ kg}$$

Como la capacidad de campo de los residuos es menor que la cantidad real de agua presente en los residuos, se formarán lixiviados.

j) Determinación de la cantidad de agua restante en el nivel 1 al final del año 6.

Agua restante = 227.45 kg - 84.63 kg = 142.82 kg

k) Determinación del peso total del nivel 1 al final del año 6.

Peso total del nivel = residuos secos + agua restante + cubierta.
= 622.36 kg + 142.82 kg + 885 kg = 1650.18 Kg

Solución. Parte 3.

Estimación de las cantidades totales de lixiviados.

1. Determinación del número total de metros cuadrados ocupados por el relleno sanitario.

a) El peso total de los residuos sólidos colocados en un nivel del relleno sanitario de 1 m² y 3 m de altura = 1475 kg

b) El área total ocupada por cada nivel es =

Área total = $(3 \times 10^8 \text{ kg/año}) / (1475 \text{ kg/m}^2 \text{ año}) = 203.389 \text{ m}^2$

2. Determinación del factor de conversión para convertir los kilogramos de lixiviados obtenidos por m² a m³/año para el relleno completo.

Factor de conversión = $(1 \text{ kg/m}^2 \text{ año} \times 203.389 \text{ m}^2) / 1000 \text{ kg/m}^3 = 0.203 \text{ m}^3 / \text{año}$

3. A continuación se presenta la tabla 3.9 que resume la cantidad total de lixiviados esperados y una gráfica de resultados.

TABLA 3.9 PRODUCCIÓN DE LIXIVIADOS

AÑO	TOTAL	
	kg/m ²	10 ⁶ m ³
1	0.0	0.0
2	0.0	0.0
3	101.74	20.7
4	141.86	28.8
5	163.78	33.3
6	84.63	17.2
7	23.65	4.8
8	51.15	10.4
9	52.20	10.6
10	36.03	7.3
11	30.61	6.2
12	30.31	6.2
13	29.65	6.1
14	28.99	5.9
15	28.33	5.8
16	27.67	5.6
17	27.00	5.5
18	26.51	5.4
19	26.07	5.3
20	25.79	5.2
21	25.74	5.2
22	25.74	5.2

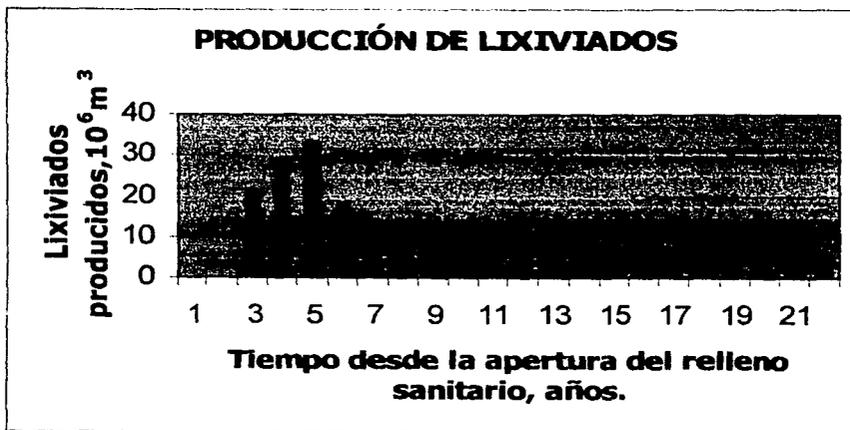


Fig. 3.8 Gráfica de la producción de lixiviados.

3.5 EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN

El suelo ha sido el vertedero de una buena parte de los residuos originados por el hombre, dada su fácil accesibilidad. La presión demográfica ha hecho que la búsqueda de terrenos suficientemente alejados de los núcleos urbanos resulte cada vez más difícil e incite a buscar otros medios naturales (agua y aire), para abandonarlos a su suerte una vez transformados convenientemente.

A diferencia de lo que ocurre en los medios hídrico y atmosférico, en el suelo, el contaminante es poco móvil. A consecuencia de ello, la probabilidad de que un contaminante se incorpore a la cadena trófica a través de su ingestión por algún organismo para el cual el suelo sea su sustrato vital es alta.

Los problemas ambientales causados por la disposición final de los residuos sólidos, se deben a que aunque existe un control en los lixiviados y biogás, no se tiene un 100 % de seguridad de que éstos no contaminen, ya sea porque la capa arcillosa o geomembrana no haya retenido eficientemente los lixiviados o por que se tiene a su vez riesgos de incendios y explosiones por el biogás, ocasionando así un efecto negativo en el medio en el ambiente y en la salud humana.

Los principales impactos ambientales que normalmente se pueden presentar en la construcción y operación de los rellenos sanitarios son los siguientes:

3.5.1 Impactos adversos

1. Durante todas las etapas del proyecto la calidad del aire será la más afectada debido a que un 73% de las actividades hay generación de polvo y partículas.
2. El suelo es un componente que se verá afectado en sus características morfológicas y en su calidad todo esto ocasionado por los movimientos de tierra, cortes, excavaciones y disposición de basura (construcción de celdas).
3. La salud y la seguridad de los trabajadores sufre afectaciones por el tipo de residuos que manejan, por la operación de la maquinaria y por las partículas que se desprenden al realizar las actividades, entre otros, por lo que esto ocasiona que también sufra modificaciones la calidad de vida de los mismos.
4. Durante la etapa de operación el agua subterránea podría sufrir afectaciones en su calidad debido a la generación de lixiviados y los pequeños derrames de hidrocarburos.
Nota: Los impactos debidos a fallas en la membrana y sistema de impermeabilización del relleno se consideran impactos potenciales dado que no esperamos que ocurra, sin embargo siempre existe el riesgo.
5. Uno de los impactos adversos también significativos durante las obras de construcción y operación del relleno sanitario será la alteración de los elementos del paisaje.

3.5.2 Impactos potenciales

1. Afectación en la calidad de los mantos freáticos debido a posibles infiltraciones de lixiviados por alguna falla o perforación de la geomembrana.
2. Afectación de la calidad del agua superficial por derrames en la laguna de lixiviados.
3. Pueden durante la etapa de operación ocasionarse incendios debido a la generación de biogas si existen fallas en el control de éste.
4. Así mismo si no se tiene un manejo adecuado del biogas, éste puede ocasionar problemas a la salud del personal del relleno como puede ser intoxicación.
5. Contaminación del suelo y agua superficial por derrames de combustión debido a fallas en el tanque de almacenamiento, dique de contención o algún accidente que lo afecte. (INE, 2001)

A continuación se presenta la tabla 3.9 en donde se resumen los impactos ambientales en un relleno sanitario partiendo de la preparación del sitio, pasando por las etapas de construcción y operación de éste, terminando en la clausura.

TABLA 3.10 IMPACTOS AMBIENTALES EN UN RELLENO SANITARIO.

PREPARACIÓN DEL SITIO Y CONSTRUCCIÓN
Emisión de partículas, fragmentos y polvo.
Aumento de los niveles sonoros(ruido).
Generación de gérmenes patógenos por la práctica del fecalismo al aire libre, afectado al suelo, agua y aire.
Alteración del patrón hidrológico tanto superficial como subterráneo.
Incorporación de sedimentos en el cuerpo de agua situado en el predio causado por el arrastre del material en partículas.
Incorporación de grasas, aceites, lubricantes, diesel, aditivos y gasolina en el suelo y agua tanto subterránea como superficial.
Incorporación de los residuos procedentes de la elaboración de las mezclas como asfálticas y concretos, así como otros desperdicios en el suelo y agua tanto subterránea como superficial.
Afectación a la salud del personal de construcción por emisiones de polvo, ruido, manejo de equipo y maquinaria.
Alteración del paisaje.
OPERACIÓN
Incremento en el tráfico vehicular sobre los caminos de acceso a la obra.
Generación de partículas y polvo, olores y humo.
Emisiones de partículas, humo y gases originados por los camiones que transitan en el lugar así como maquinaria y equipo de operación.
Dispersión de basura ligera por el viento.
Generación de biogas afectando la calidad del aire y la salud del personal de operación

Generación de gérmenes patógenos por la práctica del fecalismo al aire libre, afectando al suelo, agua y aire.
Incorporación de grasas, aceites, lubricantes, diesel, aditivos y gasolina en el suelo y agua tanto subterránea como superficial.
Generación e infiltración de lixiviados afectando tanto la calidad del suelo como del agua subterránea.
Aumento de los niveles sonoros.
Afectación a la salud del personal de operación por las emisiones de polvo, ruido, olores, gases, humos, ruido, manejo de equipo y maquinaria, etc.
Afectación del paisaje.
Proliferación de la fauna nociva.
CLAUSURA
Generación e infiltración de lixiviados afectando tanto la calidad del suelo y del agua.
Generación de partículas y polvo al cubrir con tierra el sitio y al realizar la reforestación.
Generación de olores desagradables por el biogas, afectando la calidad del aire y provocando incendios.
Proliferación de fauna nociva.
Alteración de los elementos del paisaje.

Fuente: Instituto nacional de Ecología.

Dentro de los puntos anteriores el que interesa de acuerdo al tema de este trabajo, es el de la contaminación del suelo por lixiviados y como la afectación a este medio influye en la contaminación del agua subterránea.

Los líquidos lixiviados que se generan durante la degradación de los residuos sólidos, contienen altas concentraciones de sustancias orgánicas tóxicas, por lo que al estar sin control, escurren, contaminando el subsuelo.

Se establecen cuatro características de la carga contaminante al subsuelo:

1. La clase de contaminantes involucrados.

La clase de contaminante involucrado en una actividad contaminante puede ser definida por:

- a) Su tendencia hacia la degradación o transformación in - situ, como resultado de actividad bacteriológica o reacción química.
- b) Su tendencia hacia el retardo con respecto al flujo de agua subterráneas como resultado de procesos como intercambio de cationes, sorción, etc.

2. La intensidad de la contaminación

Se puede definir la intensidad de la contaminación como:

- a) La concentración relativa de cada contaminante involucrado con relación a los valores recomendados por la legislación correspondiente en cada país para la calidad de agua potable.
- b) La proporción de la recarga local del agua subterránea afectada por la contaminación.

3. El modo de disposición del subsuelo

Se puede definir el modo de disposición del contaminante al subsuelo por:

- a) La carga hidráulica asociada con el contaminante, incluyendo infiltración natural de precipitación.
- b) La profundidad bajo superficie a la que el efluente es descargado o donde la lixiviación de los residuos sólidos ocurre.

4. El tiempo de aplicación de la carga contaminante.

Se puede definir el tiempo de aplicación de carga contaminante considerando:

- a) La probabilidad de que el contaminante sea descargado al subsuelo, que en la mayoría de las de situaciones será alta, con la excepción del caso de accidentes ambientales.
- b) El periodo durante el cual se aplica la carga, también una amplia variación de horas o décadas.

Cada una de estas características interactúa con un diferente componente de vulnerabilidad de contaminación del acuífero, y esta interacción determina el grado del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas. De esta manera es difícil justificar los intentos para combinarlos dentro de un solo índice que pretenda clasificar la carga contaminante al subsuelo (Foster, 1988).

Los residuos están compuestos físicamente por un 40 a 50 % de agua, vegetales, animales, plásticos, desechos combustibles, vidrio, etc., químicamente están compuestos por sustancias orgánicas y compuestos minerales (ibídem).

Las sustancias líquidas y los sólidos disueltos y suspendido tienden a percolar por la masa de residuos y posteriormente en el suelo. Éste está constituido por materia sólida, aire y agua. A partir de determinada profundidad se encuentra el nivel freático donde el agua se mueve a baja velocidad de alta a baja presión horizontalmente y en dirección vertical por efecto de la gravedad, por ascensión capilar entre los granos del suelo (ibídem).

Las sustancias contaminantes del lixiviado al percolar a través del suelo, adquieren gran agilidad al llegar al nivel freático y puede contaminar el agua

de los manantiales, las subterráneas por las fisuras y otras fallas de las rocas y suelos impermeables, a la vez de causar un efecto negativo en la calidad del suelo (ibídem). La filtración de los contaminantes depende de la permeabilidad del suelo que se ha tratado en el punto 3.1

También se toma en cuenta el micro clima del cual se tiene a la lluvia que influye en los fenómenos biológicos y químicos, con el transporte de contaminantes, problemas en vías de acceso y del trabajo en si del relleno sanitario, por lo tanto éste debe ser drenado superficialmente por la periferia y el fondo del relleno. El flujo de agua y el transporte de contaminantes desde la superficie al nivel freático tiende a ser un proceso lento en muchos acuíferos. Ésto significa que puede tomar muchos años, antes de que se detecten los efectos de contaminación (ibídem).

Entre los constituyentes inorgánicos nombrados en las recomendaciones como adversos a la salud humana, se encuentra el nitrato como el más ampliamente distribuido y problemático por su movilidad y estabilidad en sistemas aeróbicos de aguas subterráneas; otros constituyentes de importancia organoléptica o estética, son el cloruro, el sulfato, el sodio y el hierro; también se encuentran niveles elevados en el agua subterránea, siendo estos componentes de los lixiviados (Foster, 1988).

El hecho de que pueda convertirse en una seria amenaza a la calidad de abastecimiento de agua subterránea ya desarrollado o por desarrollar, dependerá de la movilidad de los contaminantes dentro del acuífero mismo (ibídem).

En el caso de México las aguas subterráneas suministran la mayor parte del abastecimiento de aguas municipales, el bajo costo y la excelente calidad natural de éstas, ha justificado su explotación para abastecer de agua potable a las áreas rurales.

Los efectos en la salud humana a través del agua de consumo, por vías aéreas o por contacto con suelos contaminados son:

Desarrollo de distintos tipos de cáncer, hiperqueratosis, inflamación crónica de las vías respiratorias, insuficiencia renal; dermatitis; síntomas neurológicos; daños reproductivos: fetotoxicidad, teratogenicidad, aborto espontáneo (EPA,2001).

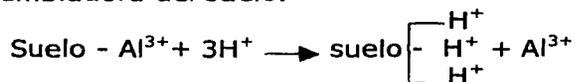
Los metales carcinogénicos que se encuentran dentro de los componentes de los lixiviados son: cadmio, cromo, plomo (ibídem).

Los metales que causan daño reproductivo que se encuentran dentro de los componentes de los lixiviados son: cadmio, cobre, plomo (ibídem).

La contaminación edáfica puede clasificarse en dos grupos: la endógena y la exógena, según si los contaminantes provienen del mismo sistema edáfico o

bien si provienen del exterior. En el primer caso, el problema surge cuando algunos de los constituyentes normales del suelo están presentes en forma química no habitual que ocasione su acumulación en determinados puntos del medio, y lo haga particularmente nocivo para las especies vivas cuyo crecimiento depende de la composición química del suelo. Hay una estrecha relación entre la composición mineral de los horizontes superficiales del suelo y la roca subyacente a él, que depende de los distintos procesos químicos que ocurren en este medio, como son las reacciones ácido - base, oxidación - reducción, complejación, así como proceso de adsorción. En este sentido, una acción externa, ya sea provocada por el hombre o ya sea por algunas condiciones meteorológicas anómalas, puede dar lugar a una descompensación del equilibrio existente entre dichas reacciones químicas en el suelo, dando lugar a una acumulación extraña de alguna especie (Domenéch,1995).

Por ejemplo, las precipitaciones ácidas sobre determinados suelos originan serios problemas al movilizar ciertos cationes que reducen la disponibilidad del nitrógeno del suelo y disminuyen la respiración del suelo. Especialmente la movilización del ion aluminio(Al^{3+}), que ocurre debido a la capacidad intercambiadora del suelo.



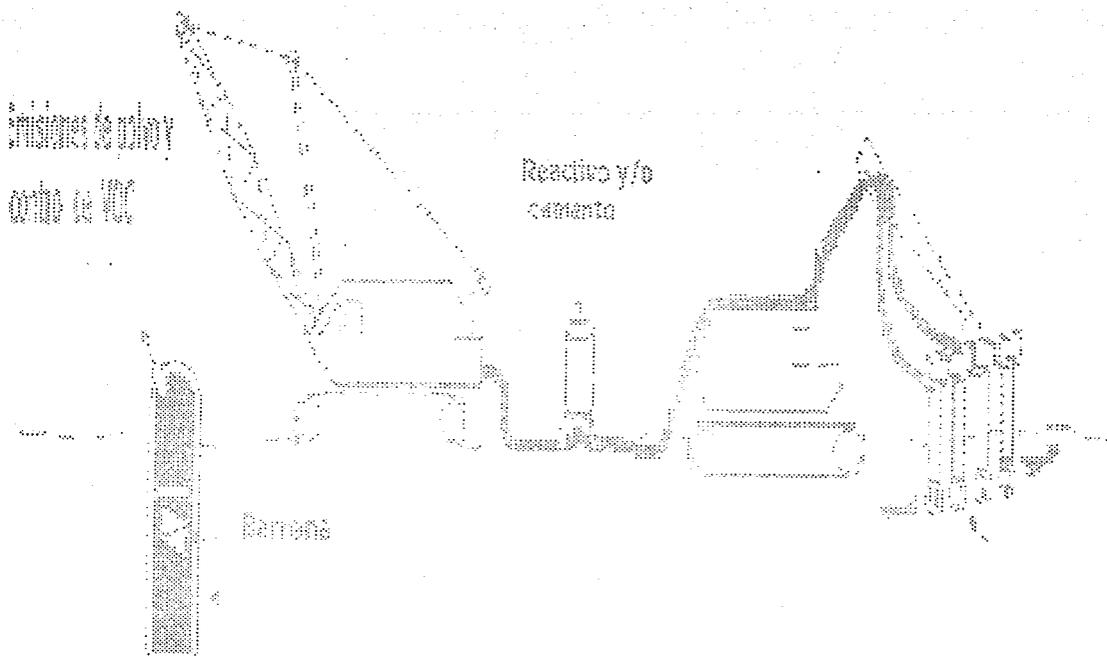
En esta situación, el ion Al^{3+} libre de desplazarse en exceso por las raíces de las plantas, afectando a su normal desarrollo.

La acidez del suelo puede originarse por procesos naturales de aireación, sin necesidad de aportes externos. Esto es lo que ocurre, por ejemplo, en determinados suelos piríticos, en los que la pirita (FeS_2) se oxida. La acidez originada ya sea por la lluvia ácida como por procesos endógenos como el anterior, se combate añadiendo carbonato de calcio ($CaCO_3$) para llevar a cabo la neutralización (ibídem).

El suelo recibe periódicamente una elevada cantidad de residuos procedentes de actividades antropogénicas. En muchos casos, estas aportaciones se realizan a un ritmo muy superior a la capacidad autodepuradora del suelo, con lo que los elementos tóxicos de los residuos se van acumulando y produciendo daños en el entorno. Muchos de estos residuos provienen de vertidos indirectos, como es el caso de los óxidos de azufre y de nitrógeno emitidos, principalmente, a causa de la combustión de carburantes fósiles. Buena parte de estos óxidos terminan su recorrido depositándose en el suelo, ya sea transformados en los correspondientes ácidos sulfúrico y nítrico o en sus sales, o bien se depositan primero y se oxidan después en el mismo suelo. Los problemas ambientales pueden venir por un defecto o una disminución de determinadas especies esenciales para el crecimiento de organismos vivos (ibídem).

Para determinar como afecta la contaminación del lixiviado en el ámbito edafológico se tomará en cuenta la textura de los suelos; ya que en suelos arcillosos hay una menor lixiviación que en suelos arenosos, pero al momento de rehabilitarlos o limpiarlos tienen una mayor dificultad las arcillas que las arenas; dentro de los suelos arcillosos se puede mencionar los siguientes: Acrisol, Cambisol, Luvisol, Nitosol, Planosol, Podzoluvisol, Rendzina, Solonetz, Vertisol, Xerosol, Yermosol; y en los suelos arenosos se encuentran: Arenosol, Fluvisol Districo, Podzol. Teniendo en cuenta esta información se puede elegir un suelo adecuado para la disposición de residuos sólidos, creando así un relleno sanitario funcional y con un control mayor de la lixiviación.

El mayor efecto que puede ocasionar la contaminación de suelos por lixiviados es la contaminación de las aguas subterráneas y a su vez tiene repercusiones en la salud humana al consumirse o entrar en contacto con los suelos contaminados; en el ámbito edafológico, daña los nutrientes y minerales de éste, a su vez dañando la vida que depende de él, evitando el crecimiento de organismos vivos.



CAPÍTULO IV

SANEAMIENTO DE SUELOS CONTAMINADOS POR LIXIVIADOS

4.1 BASES DEL SANEAMIENTO

En los últimos años los esfuerzos en el área de la hidrogeología se han dirigido a los problemas relacionados con la contaminación del subsuelo y los acuíferos y, en especial, a las tecnologías de saneamiento o rehabilitación de suelos y acuíferos.

La limpieza de suelos, es uno de los aspectos de la rehabilitación ambiental que menos interés ha recibido en el pasado aunque, no obstante, la cantidad de suelo contaminado ha ido creciendo durante los últimos años de una forma alarmante.

Desde la década de los 60 se empezaron a tomar medidas, en distintos países, para limpiar sitios contaminados por la emisión de cierto tipo de residuos. Para este tipo de problemas fue necesario llevar a cabo estudios en geología, geotecnia, hidrogeología, geoquímica, biología y química. En los años posteriores, se involucró la bioquímica y la biotecnología, debido a las transformaciones de muchos compuestos tóxicos que en el subsuelo pueden volverse inocuos mediante la participación de bacterias que son capaces de biodegradar los compuestos químicos. A esta última técnica se le llama biorrestauración, (Iturbe, 1998).

En México, debido al acelerado crecimiento de la población y a las actividades agrícolas e industriales, se ha causado un notable deterioro en la calidad ambiental, así como una acelerada generación de residuos de todo tipo. Se estima que se genera 72 300 ton de residuos al día, de los cuales 21,918 ton, aproximadamente corresponden a residuos peligrosos (Instituto Nacional de Ecología, 1996). Esto ha hecho que México cuente con gran cantidad de sitios contaminados por diversas actividades y que, en la mayoría de los casos, se desconozcan los niveles de afectación debido a la falta de monitoreo.

El costo que representa la aplicación de las tecnologías de rehabilitación es muy elevado y no se ha asimilado la idea de que es más costoso limpiar que controlar la contaminación o evitarla.

Para tomar la decisión en cuanto la mejor técnica para restaurar un sitio contaminado se requiere de lo siguiente:

- Conocer las características hidrogeológicas del sitio.
- Conocer las características de los contaminantes que se requiere remover.
- Conocer el área afectada y los niveles de concentración.
- Contar con normas o criterios que, de acuerdo con estudios de riesgo para la salud y ecológico, se asignen según el uso de cada sitio, a fin de saber hasta que niveles de concentración se requiere llegar con la rehabilitación.

- Analizar cada técnica de acuerdo con los puntos anteriores.
- Llevar a cabo un análisis de costo beneficio de las opciones para cada sitio.

4.1.1 Metodología para la evaluación de suelos contaminados

En México existe poca experiencia en el diagnóstico y saneamiento de sitios contaminados y tampoco hay una normatividad que indique criterios para definir los niveles de limpieza. Para determinar el tipo de muestreo y las técnicas de restauración adecuadas al problema, se requiere el conocimiento previo del sitio y la forma de transporte del contaminante, de acuerdo con las características hidrogeológicas. A continuación se presentan lineamientos para el diagnóstico de sitios contaminados (ibídem).

4.1.1.1 Fuente de contaminación

La identificación de las fuentes que causaron la contaminación del suelo en zonas afectadas por actividad industrial conduce directamente, a ubicar donde se encuentran las principales instalaciones por las cuales pueden ocurrir derrames, así como las prácticas inadecuadas del manejo de los residuos, peligrosos o no (ibídem).

4.1.1.2 Parámetros por considerar

Para determinar los parámetros que deben medirse en el sitio contaminado se requieren dos antecedentes:

- Identificación del tipo de contaminante que está produciendo el problema.
- Caracterización del subsuelo e hidrogeología del sitio.

4.1.1.3 Parámetros para evaluar la magnitud y extensión de la contaminación

Se debe contar con la medición del pH del suelo y del potencial de oxidación – reducción, para evaluar la posibilidad de lixiviación y ponderar el transporte hacia el agua subterránea.

4.1.1.4 Parámetros para caracterizar suelos e hidrogeología

Respecto a las características del subsuelo, se requieren los siguientes parámetros:

- Estratigrafía del sitio.
- Permeabilidad y porosidad.
- Profundidad del nivel estático.

- Tipo y profundidad del acuífero subyacente.

Dependiendo del tipo de suelo de que se trate, se escogerá el tipo de sondeo y muestreo, pues en rocas muy duras el muestreo puede resultar demasiado costoso y poco eficiente para la obtención de muestras contaminadas.

4.1.1.5 Parámetros para definir los niveles de limpieza

Los principales criterios para seleccionar los parámetros a partir de los cuales se definen las metas de limpieza consideran los contaminantes más tóxicos y más persistentes, que presentan mayor movilidad y se detectan con mayor frecuencia, por lo que representan un riesgo para la población expuesta (ibídem).

Cuando el acuífero se localiza a poca profundidad y es una fuente de abastecimiento, es necesario medir las concentraciones de los contaminantes en muestras de suelo y de agua, dado que el nivel de limpieza o protección será la concentración en suelo que garantice que en el acuífero se cumple los criterios para cuerpos de abastecimiento. Otros criterios que influyen son el tipo de suelo, la profundidad a la cual se encuentra la pluma contaminante y las condiciones físico - químicas que favorezcan la desorción de los compuestos del suelo, principalmente cuando se trata de ciertos metales y otros compuestos orgánicos poco solubles, los cuales en otras condiciones se consideran de baja movilidad(ibídem).

4.1.1.6 Estrategia del muestreo

El muestreo es el aspecto más importante en el trabajo de diagnóstico de un sitio contaminado, ya que con este se identifica el nivel de contaminación y la extensión de área dañada. Para llevar a cabo el diseño del muestreo se debe determinar:

- Tipo de muestreo: agua, suelo o vapores.
- Ubicación de los puntos de muestreo
- Número de puntos de muestreo.

4.1.1.6.1 Tipo de muestreo

El tipo de muestra que se debe obtener depende del tipo y permeabilidad del suelo, así como de la naturaleza y extensión de la contaminación.

4.1.1.6.2 Vapores

El muestreo de vapores in situ se utiliza con frecuencia y se emplea un detector específico. Para su aplicación se requieren sondeos, de preferencia a

diferentes profundidades, en los cuales se introduce la sonda y se toma la lectura.

Este tipo de muestreo es conveniente para tener una idea general de la magnitud de la contaminación; sin embargo resulta limitante debido a que:

- Con los datos de muestra en vapores no es posible aplicar el análisis de riesgo para la salud, ya que la metodología de este considera concentraciones en el suelo o en agua.
- Los compuestos volátiles totales pueden no dar una idea precisa de los contaminantes presentes en la zona.

4.1.1.6.3 Agua

El muestreo de agua es importante cuando el nivel estático se encuentra a poca profundidad. En este tipo de muestreo se instalan piezómetros o pozos a una profundidad por debajo del nivel estático a fin de obtener las muestras. El muestreo es conveniente en sitios donde el terreno es muy duro y es difícil obtener núcleos de suelo para analizar.

4.1.1.6.4 Suelo

El muestreo de suelo es adecuado en la zona no saturada (es la región en la que en los poros hay aire), que es la que primero se contamina, pero también se emplea para obtener muestras de la zona saturada (es una región en la que la única fase fluida es un medio acuoso).

Se realizan mediante perforaciones del subsuelo, a la profundidad requerida, con un método que no contamine o agregue alguna sustancia a la muestra. Los métodos de perforación suelen ser a través de rotación e hincado por golpeo.

4.1.1.6.5 Ubicación de los puntos de muestreo

Uno de los factores más importantes en el diseño del muestreo es la ubicación para muestrear. Los factores a considerar son los siguientes:

- La selección debe realizarse con base en la dirección del flujo de agua subterránea; si el nivel estático está a gran profundidad, debe considerarse la pendiente del terreno cuando se trate de derrames superficiales, ya que la contaminación escurrirá por el terreno y posteriormente se infiltrará verticalmente por la zona no saturada.
- Debe considerarse la instalación de al menos un punto de muestreo gradiente hidráulico arriba de la zona contaminada o de la fuente de contaminación, a fin de que sirva como punto testigo para comparar con la zona contaminada (ibídem).

4.1.1.6.6 Número de punto de muestreo

El número de puntos debe ser suficientes para lograr establecer la extensión de la contaminación, así como las zonas principales de migración horizontal; sin embargo, el costo se eleva considerablemente a mayor número de puntos de muestreo y análisis, por lo que estos deben ser los mínimos necesarios.

4.1.1.7 Definición de los niveles de limpieza

La evaluación del riesgo para la salud es la mejor herramienta disponible para analizar los posibles efectos indeseables para la población expuesta a las sustancias contaminantes en un sitio dado. Para aproximarse a una evaluación de los efectos a largo plazo es necesario incorporar criterios de estimación de la movilidad de los contaminantes de interés, principalmente en suelos donde se espera que domine el transporte horizontal, de manera que los niveles de limpieza reflejen tanto la posibilidad de inmovilidad de los contaminantes como la migración a largo plazo (ibídem).

Hasta la fecha ha sido común consultar los niveles de limpieza recomendados en referencias internacionales. Sin embargo es necesario establecer criterios bajo los cuales dichos datos sean considerados como guías, y no necesariamente metas, para el saneamiento en sitios contaminados (ibídem).

Las tecnologías más utilizadas para la rehabilitación de suelos contaminados se pueden llevar a cabo tanto en el mismo sitio del problema como fuera de él; tratamiento *in situ* y tratamiento *ex situ*, y se dividen en *on site* (el suelo es excavado y tratado en el mismo terreno) y en *off site* (se requiere excavación, transporte del material contaminado y tratamiento adecuado en un lugar distinto de donde se encuentra el suelo contaminado). Así mismo, se clasifican de acuerdo con el tipo de proceso aplicado en: **físicas, químicas, biológicas y térmicas.**

4.1.1.7.1 Tratamiento físico

Algunos constituyentes químicos presentes en sitios contaminados se tratan a través de procesos de separación y purificación, como filtración, centrifugación, flotación, destilación, evaporación, extracción por solventes, ósmosis inversa, intercambio iónico, adsorción por carbón activado, decantación e inmovilización de constituyentes por solidificación, este tipo de técnicas generalmente no alteran la composición química de los contaminantes. Los procesos físicos son ocasionalmente utilizados como única opción de tratamiento final para cualquier material contaminado. Los objetivos de la mayor parte de los tratamientos físicos consisten en separar los materiales peligrosos de los que son considerados como menos peligrosos (ibídem).

4.1.1.7.2 Tratamiento químico

Ciertos tipos de productos químicos o materiales contaminantes pueden separarse o hacerse menos peligrosos a través de procesos de tratamiento químico. Los productos de las reacciones químicas comúnmente presentan un menor grado de dificultad para ser removidos del suelo y son más fácilmente tratados (ibídem).

4.1.1.7.3 Tratamiento biológico

El tratamiento biológico ha llegado a ser, desde el punto de vista costo – beneficio, una alternativa tecnológica viable para tratar una amplia variedad de contaminantes orgánicos. Los procesos biológicos pueden transformar un material peligroso en elementos no tóxicos como agua, dióxido de carbono y otros productos inocuos, mediante el uso de microorganismos. Dicho tratamiento es una opción muy sensible a los cambios en la composición y concentración orgánica de los contaminantes por ser tratados. Por otro lado, el tratamiento microbiológico no tiene efectos en disolver sustancias inorgánicas; incluso, niveles significativos de compuestos orgánicos e inorgánicos pueden inhibir la actividad biológica o aun eliminar los microorganismos (ibídem).

4.1.1.7.4 Tratamiento térmico

Las tecnologías de tratamiento térmico emplean calor para destruir o transformar los contaminantes de interés, los procesos de destrucción térmica controlan la temperatura y el oxígeno disponible, y transforman los materiales peligrosos en dióxido de carbono y otros productos de combustión. La degradación térmica es aplicable a materiales contaminados que contienen concentraciones significativas de compuestos orgánicos y que pueden ser utilizados a través de los diferentes tipos de incineración.

Existen además medidas de contención o confinamiento con el objetivo de prevenir o reducir significativamente el tránsito de la contaminación en el suelo o en el agua subterránea. En general, los métodos de contención son desarrollados cuando existen grandes extensiones de superficies contaminadas, donde es imposible excavar y remover debido a un riesgo potencial o altos costos.

La principal ventaja de estos sistemas es que previene una mayor migración de la pluma de contaminación, y permiten una reducción de la contaminación en sitios donde la fuente es desconocida, inaccesible, o donde se requiere mucho tiempo para desarrollar las medidas de saneamiento (ibídem).

4.2 TÉCNICAS DE CONFINAMIENTO

Se aplican estas técnicas en lugares de disposición final que contengan residuos tóxicos, que por esta característica, presenta problemas en su manipulación y traslado. El confinamiento es considerado como la última alternativa y sólo para aquellos residuos que no puedan ser manejados de otra manera, los cuales son considerados como residuos peligrosos, dentro de éstos se encuentran los generados por la actividad industrial y los biológicos - infecciosos sin tratamiento.

Cuando el volumen de residuos acumulados en un lugar de disposición final es superior a 10,000 m³ y las técnicas de tratamiento convencional son inviables, se recurre al aislamiento y sellado de dicho lugar. En esta situación se recurre al aislamiento y al sellado, para evitar la migración de contaminantes, tanto en la superficie como en el subsuelo (aguas subterráneas).

Las principales tecnologías de aislamiento son las siguientes:

4.2.1 Sistema de cubierta

Cualquier sistema de cubierta de un emplazamiento contaminado tiene que ser lo suficientemente eficiente para evitar la migración de lixiviados y gases.

La estructura general de un sistema de cubierta se divide en las siguientes capas:

4.2.1.1 Protección superficial

Son las más externas y tienen que ser suficientemente resistentes para soportar la acción de los agentes atmosféricos, el tránsito de vehículos y personas, etc. Existen diversas combinaciones de diseño: cobertura vegetal superficial, suelos de protección, capas de cantos e, incluso, geomallas y pavimentos (Seoáñez, 1999).

4.2.1.2 Capa de drenaje

Su función es interceptar el agua de precipitación que se haya podido infiltrar a través de las capas de protección superficiales. Se utilizan capas drenantes simples, constituidas por materiales granulares de alta permeabilidad (grava y arena). Con las capas drenantes se pueden utilizar conjuntamente geotextiles, que actúan como filtros, reteniendo los sólidos en suspensión que potencialmente pueden contener el agua de infiltración superficial (ibídem).

4.2.1.3 Capa o sellos de arcilla compactada y geomembranas

Es el cuerpo de aislamiento principal, y actúa como sello que impide el contacto entre el agua de las precipitaciones y los residuos sólidos, evitando la formación de lixiviados.

El coeficiente de permeabilidad (K) de una arcilla varía en función del porcentaje en humedad de compactación que contenga. Para un 15% de humedad se puede llegar a una $K = 10^{-7}$ cm/s (condiciones de mayor impermeabilidad) (ibídem).

La compactación, dentro de la dificultad que representa hacerla sobre residuos. Es importante que se efectúe lo mejor posible y con el porcentaje de humedad adecuado, para dotar a la capa de arcilla con una estructura interna homogénea y un coeficiente de permeabilidad bajo.

Como capas o barreras impermeables se pueden utilizar también geomembranas. Las más frecuentes son las de polietileno de alta densidad (HDPE), ya que presentan una gran resistencia a la degradación química. Se comercializan también geomembranas de otros tipos (polietileno clorosulfonado, elastómeros de poliéster, gomas butílicas, etc.) (ibídem).

La instalación de una geomembrana se puede realizar de modo individual o bien conjuntamente con una capa de arcilla, constituyendo en este caso una barrera doble impermeable.

4.2.1.4 Capa drenante de recolección de gases

Si existen residuos susceptibles de fermentación, entre la capa impermeable y estos se debe intercalar una capa de naturaleza drenante y porosa, para la recolección de los gases de esa fermentación (ibídem).

4.2.2 Pantallas impermeables o paredes de aislamiento

Es un sistema muy efectivo de contención de contaminación en el subsuelo. Pueden descansar directamente sobre el estrato confinante de un acuífero libre, o bien pueden dejarse suspendidas a cierta profundidad, sin llegar a apoyarse en dicho estrato.

A continuación se presenta los tipos de pantallas que existen:

4.2.2.1 Pantallas impermeabilizantes base de lechadas

Para su construcción se excava una zanja cuyo ancho es el propio de la pared de aislamiento que desea construir. Para mantener la estabilidad de la zanja y para evitar desprendimientos, se utiliza una lechada de agua - bentonita,

obteniéndose un fluido viscoso de mayor densidad que el agua, que contrarresta el empuje del suelo y forma costras impermeables.

Mantener la estabilidad de la zanja es fundamental, sobre todo cuando la excavación se realiza a mucha profundidad. Una vez que se llega a la profundidad deseada, se va rellenando la zanja en dirección al frente de avance de la excavación (ibídem).

Las lechadas de relleno que conforman propiamente la pantalla pueden ser de diversos tipos:

4.2.2.1.1 Lechada suelo – bentonita

El propio suelo excavado de la zanja se mezcla con bentonita (arcilla montmorillonítica sódica).

El coeficiente de permeabilidad de la lechada una vez endurecida, puede llegar a 1×10^{-8} cm/s.

4.2.2.1.2 Lechada cemento – bentonita

En este caso el suelo excavado no se utiliza, y se recurre a una combinación de agua, cemento, bentonita y arena en suspensión.

El endurecimiento de la lechada produce una pantalla con un coeficiente de permeabilidad de 1×10^{-6} cm/s, o inferior. La impermeabilización de estas pantallas se puede modificar colocando en la zanja geomembranas de polietileno de alta densidad. Como se muestra en la figura 4.1

4.2.2.2 Pantallas estructurales de concreto

La pantalla impermeable es un muro de concreto armado, también conocidas como muros - pantalla. Su función principal es la contención de tierras durante la excavación. Para su construcción se excava la zanja y se rellena con paneles consecutivos de concreto armado.

Es un método de impermeabilización muy efectivo ($K < 1 \times 10^{-6}$ cm/s), pero tiene el inconveniente de su alto costo con relación a otros métodos.

4.2.2.3 Pantallas por inyección de cemento (sistema Jet Grouting)

El método consiste en introducir mediante perforación un tubo en el suelo. Dicho tubo va equipado con inyectores ortogonales perpendiculares a su eje. Una vez concluida la perforación, se retira el tubo con inyección simultánea de cemento a alta presión, obteniéndose una columna cilíndrica cementada cuyo diámetro puede alcanzar los 2 metros. La unión de estas columnas forma

pantallas o barreras perimetrales de la zona contaminada. Se puede construir barreras circulares, rectangulares, etc. En función de la geometría en planta del emplazamiento contaminado. El coeficiente de permeabilidad que se obtiene con este método es muy baja ($K \leq 10^{-8}$ cm/s) (ibídem).

El cemento se puede sustituir por otros materiales de inyección (resinas de poliuretano, etc.) (ibídem).

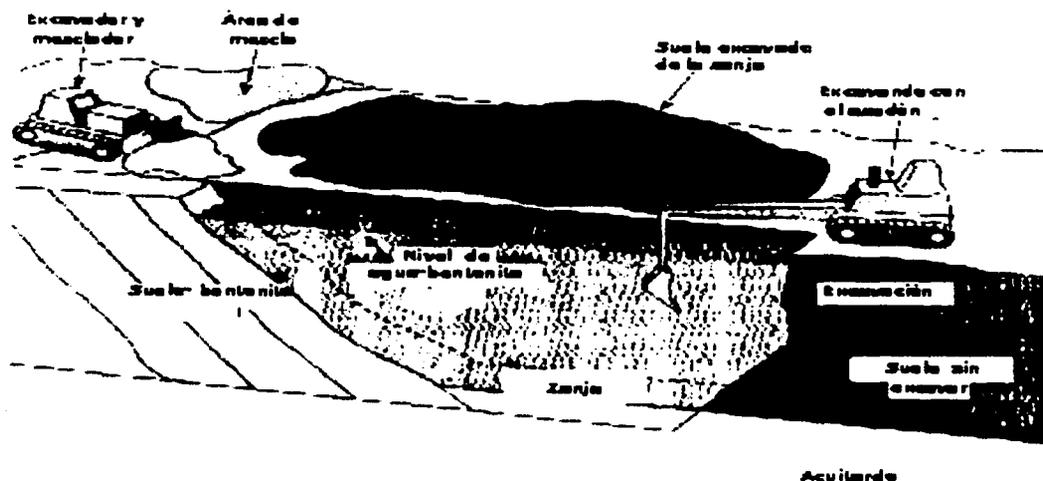


Fig. 4.1 Pantallas impermeabilizantes a base de Lechada cemento - bentonita.

4.3 TÉCNICAS DE TRATAMIENTO IN SITU

Las técnicas de tratamiento in situ se refieren al tratamiento de suelo contaminado sin excavarlos ni sacarlos de su lugar.

Las principales técnicas son:

4.3.1 Sistemas de extracción por vapor

El sistema de extracción por vapor (SVE) es una tecnología que ha sido ampliamente utilizada para la rehabilitación de las zonas vadosas o no saturadas de sitios contaminados con compuestos orgánicos volátiles (VOC), orgánicos semivolátiles (SVOC) y líquidos no acuosos (NAPL) que pueden estar atrapados en la zona no saturada, como saturación residual, y en la zona saturada, como productos flotantes (Iturbe,1998).

La técnica se basa en un pozo de vacío, por el cual se induce el flujo de vapor a través del subsuelo, con lo que aumenta el grado natural de volatilización. Con este proceso los VOC son arrastrados del suelo y pasan a la fase de vapor. El vacío actúa desorbiendo los compuestos de la zona no saturada y, por otro lado, incrementa la aireación del suelo con lo que se aumenta las posibilidades de biodegradación de los compuestos más pesados, que no pueden ser arrastrados durante el sistema de vacío, como se muestra en Fig. 4.2.

Los factores que deben tomarse en cuenta son: el tipo de suelo, profundidad de acuífero, porosidad, permeabilidad, contenido de agua y contenido de carbono orgánico.

Los suelos arenosos o de grano grueso, seco y con bajo contenido de carbono orgánico son más rápida y fácilmente limpiados que un suelo de grano fino y con alto contenido de carbono orgánico, ya que los compuestos se adsorben más a las partículas del suelo (ibídem).

Los principales contaminantes que remueve esta técnica son los compuestos orgánicos volátiles y algunos combustibles; esta es aplicable solo a compuestos volátiles que presentan valores de la constante de la Ley de Henry mayores de 0.01 o una presión de vapor mayor de 0.5 mm Hg.

Las ventajas asociadas con este sistema son:

- Su impacto ambiental es bajo.
- Los disturbios en el sitio son mínimos.
- El costo es menor que el de otras tecnologías.
- Trata grandes volúmenes de suelo.
- Es fácil de instalar y utilizar.
- Los tiempos de limpieza son cortos.
- El material tóxico se remueve del suelo y posteriormente se destruye, en vez de ser retenido y reubicado.

Las desventajas asociadas de este sistema son:

- Los suelos compactados o un alto contenido de humedad (mayor de 50%) tiene una reducida permeabilidad al aire por lo que se requiere un

alto nivel de vacío para remover los contaminantes. Esto provoca incremento de los costos y baja eficiencia en la operación.

- En suelos con grandes variaciones de permeabilidad, se requiere una amplia red de pozos de extracción de lo cual puede resultar una desigualdad remoción de contaminantes en la zona afectada.
- Se aplica solo en suelos de alta permeabilidad con coeficientes mayores de 10^{-3} cm/s.
- Los suelos de alto contenido orgánico o excesivamente húmedo tiene una alta capacidad de sorción de VOC, lo cual provoca una reducción en los niveles de traslado de contaminantes.
- Las emisiones de vapor pueden requerir tratamiento, a fin de eliminar el posible daño al público y al ambiente.
- Como resultado del tratamiento de los vapores contaminados, los líquidos residuales y el carbón activado usado pueden requerir tratamiento y/o disposición final.
- Altos volúmenes de escurrimiento saturan la zona vadosa originando una reducción en la eficiencia del método.

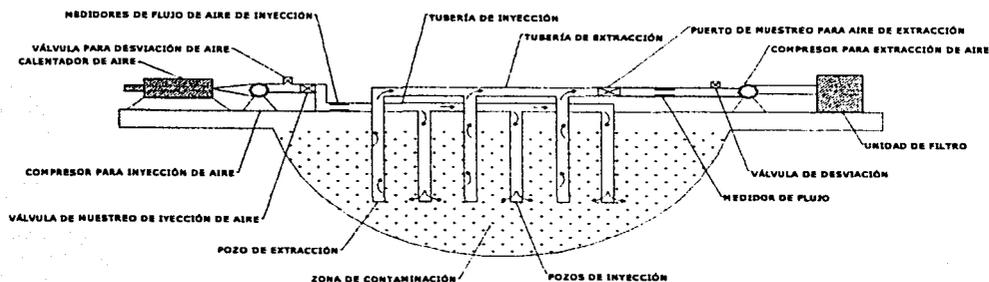


Fig.4.2 Sistema de extracción por vapor.

4.3.2 Lavado del suelo o flujo con soluciones surfactantes(soil flusing)

El proceso de lavado in situ (SF) consiste en aplicar un flujo con soluciones surfactantes o agua, a través de pozos de inyección o mecanismos de irrigación. El fluido de lavado se introduce en el suelo contaminado mediante pozos de inyección verticales u horizontales, sistemas de irrigación o la

combinación de ambos. La solución se infiltra a través de la matriz del suelo y absorbe los contaminantes a su paso, mientras se dirige a los pozos o zanjas de recuperación. La solución y el agua subterránea son interceptadas y bombeados por un sistema de recuperación y tratamiento con el objeto de utilizarlos nuevamente. Esta técnica se utiliza en combinación con otras tecnologías de tratamiento como carbón activado, biodegradación o precipitación química, que destruyen los contaminantes o los remueven del líquido de extracción y del agua subterránea, como se muestra en Fig. 4.3.

El sistema utiliza agua como fluido de lavado o solventes (como soluciones ácidas, básicas o agentes tensoactivos) para contaminantes que son poco solubles en agua. El fluido de lavado se selecciona con base en su habilidad para solucionar los contaminantes y por sus efectos en la salud y el medio ambiente. Para compuestos hidrofóbicos (hidrocarburos), el sistema SF utiliza solventes orgánicos. Para contaminantes hidrofílicos se utiliza como solvente el agua(ibídem).

Esta tecnología es muy aplicable a compuestos orgánicos solubles y a metales, que se encuentran distribuidos en áreas extensas en concentraciones bajas o medias. El lavado de suelo es más efectivo cuando los contaminantes presentan alta solubilidad en agua, y un coeficiente bajo de partición suelo-agua, K_{oc} , el cual es una medida del equilibrio entre el contenido orgánico del suelo y el del agua. Un valor bajo de K_{oc} indica una tendencia favorable de lixiviación de los contaminantes del suelo y es el principal factor que controla la efectividad de la técnica(ibídem).

Los factores que se toman en cuenta son: las características del suelo, la hidrogeología del sitio, las características físicas y químicas de los contaminantes, los agentes de extracción y el nivel de mezclado por utilizar, la permeabilidad del suelo, ya que si el suelo es de baja permeabilidad ($K < 1.0 \times 10^{-5} \text{cm/s}$) limita la habilidad del fluido de extracción por percolar a través de la matriz del suelo en un tiempo razonable, pero si el suelo tiene una permeabilidad ($K > 1.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$), es mayor su efectividad. Los suelos con alto contenido de arcilla y limo tienden a ser menos permeables y en tales casos esta tecnología no es considerada como la única alternativa de tratamiento(ibídem).

Los tiempos de rehabilitación son largos (uno o varios años), debido a la lentitud de los procesos de difusión en la fase líquida, y depende en gran medida de la permeabilidad y gradiente hidráulico del sitio.

4.3.3 Estabilización y solidificación

Con este tratamiento, mediante un proceso de mezcla con aditivos se persigue modificar las características físicas de la masa contaminante, aumentando su resistencia y disminuyendo su permeabilidad.

El método de aplicación se lleva a cabo mediante una mezcladora de palas de rotación, que penetra en el terreno y añade los reactivos para conseguir su solidificación y estabilización. La mezcladora es alimentada en superficie por tanques de reactivo. Durante la mezcla, para evitar la emisión de partículas, existe un colector de polvo y un sistema de tratamiento con carbón activado (ibídem), como se muestra en la figura 4.4.

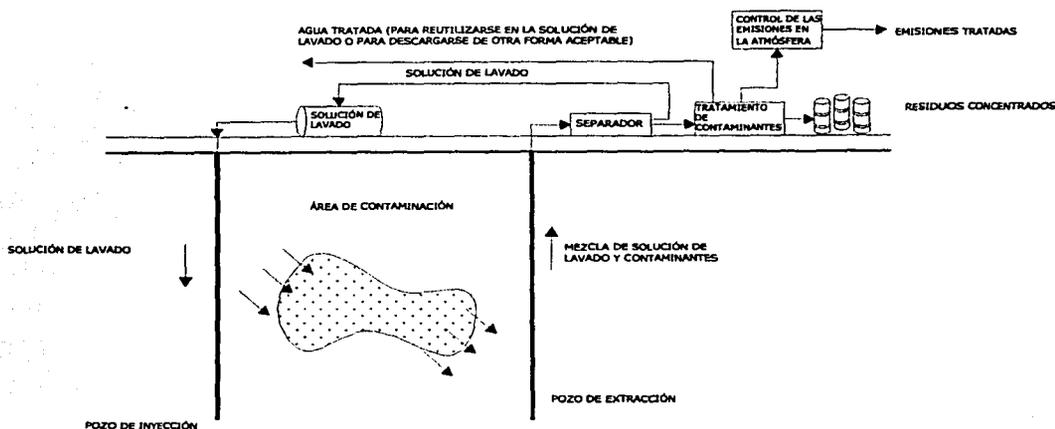


Fig. 4.3 Lavado del suelo o flujo con soluciones surfactantes.

La estabilización (fijación química) se refiere a la modificación química de los residuos, ya sea transformándolos o inmovilizándolos, para formar compuestos insolubles que atrapan a los elementos o compuestos tóxicos. Existen dos tipos de estabilización, la estabilización química y la estabilización física. La primera implica la inmovilización de los residuos tóxicos por medio de una reacción química, para formar compuestos insolubles dentro de una estructura cristalina estable; la segunda se refiere al mezclado de lodo o residuo semilíquido con agente aglutinante, a fin de producir sólidos de granulación gruesa, de consistencia parecida al suelo, que puede ser transportada hasta un sitio de disposición final.

La solidificación se refiere a las técnicas que encapsulan el residuo en un monolito sólido de alta integridad estructural. La encapsulación puede ser de

partículas finas (microencapsulación) o de un bloque de residuos (macroencapsulación). La solidificación no necesariamente implica la interacción química entre los residuos y los agentes solidificantes; sin embargo, estos pueden unirse mecánicamente a los residuos dentro del monolito. Esta estructura modificada también reduce significativamente la posibilidad de lixiviación, al reducir la movilidad y el área superficial expuesta del desecho, minimizando la posibilidad de contaminación del agua subterránea y superficial (ibídem).

La encapsulación implica el completo revestimiento de partículas tóxicas o del residuo aglomerado con una nueva sustancia. La microencapsulación es la encapsulación de partículas individuales y la macroencapsulación es la aglomeración de partículas de residuos o materiales microencapsulados.

Las técnicas de estabilización y solidificación son de dos tipos, orgánicos e inorgánicos, de acuerdo con la naturaleza de los químicos utilizados y no de la composición del residuo. Los sistemas de estabilización y solidificación pueden ser agrupados en las siguientes siete clases de proceso.

1. **Solidificación mediante la adición de cemento.** Es la mezcla de materiales contaminados con varios reactivos cementantes, para producir un sólido granular o monolito.
2. **Solidificación mediante la adición de cal u otros materiales puzolánicos.** La cal y materiales puzolánicos se combinan para producir matrices cementadas, que atrapan el residuo física y químicamente.
3. **Residuos embebidos en materiales termoplásticos tales como la parafina o polietileno.** El residuo se mezcla con un polímero a temperatura elevada, usualmente 100 °C.
4. **Microencapsulamiento por termoendurecimiento.** Se utilizan materiales que permanecen sólidos después de subsecuentes ciclos de calentamiento y enfriamiento.
5. **Macroencapsulamiento de residuos con un revestimiento inerte.** Consiste en cerrar los materiales residuales dentro de una cubierta impermeable e inerte.
6. **Tratamiento de los residuos para producir un producto cementado con adición de otros constituyentes.** Una porción del residuo, usualmente 8 a 10 % en peso, se calcina y remezcla con aditivos.
7. **Formación de un vidrio por fusión con sílica.** Los residuos son mezclados con sílica y calentados a temperaturas muy altas, y después se enfrían.

Los dos primeros métodos son los más utilizados, y son adecuados para la mayoría de los residuos inorgánicos. Las técnicas más recientes se reservan para residuos problemáticos como los radioactivos o algunos con alto contenido orgánico.

Los métodos de estabilización y solidificación orgánica usan una variedad de polímeros, termoplásticos, resina y otras sustancias orgánicas para encapsular contaminantes. Estos métodos se utilizan en la mayoría de los casos en pequeños volúmenes debido al alto costo de los reactivos orgánicos y materiales utilizados (ibídem)..

Las técnicas con cemento generalmente utilizan materiales de cemento Portland ordinario y aditivos, para mejorar las características físicas y disminuir pérdidas por lixiviación del residuo solidificado resultante. El mecanismo de estabilización es la formación de productos de hidratación de compuestos silicatados y agua, con los que se forma un gel de silicato de calcio hidratado. La principal ventaja del cemento Portland es su rapidez para alcanzar una alta resistencia, de 2 a 48 horas. Este material inmoviliza químicamente algunos metales mediante la conversión a óxidos relativamente insolubles e hidróxidos en un medio alcalino. Una desventaja de este es que muchos contaminantes no se enlazan químicamente con la matriz cementante, solamente son encapsulados, y quedan sujetos a descargas potenciales por lixiviación.

Las ventajas de los procesos inorgánicos son:

- Bajo costo.
- Buena estabilidad a largo plazo, tanto física como química.
- Amplia disponibilidad de los reactivos químicos.
- Ausencia de toxicidad de los reactivos químicos.
- Facilidad de uso del proceso.
- Alta resistencia a la biodegradación.
- Baja solubilidad en agua.
- Baja permeabilidad al agua.
- Buenas características mecánicas y estructurales.

Las desventajas de los procesos inorgánicos son:

- Requerimiento de gran cantidad de material crudo.
- Ciertos residuos, como los que contiene compuestos orgánicos, pueden causar algunas dificultades en la rehabilitación.
- El peso y el volumen del producto tratado se incrementa considerablemente.
- Los residuos tratados son vulnerables a la lixiviación, especialmente ácidos débiles y por lo cual se requerirá un sello adicional.

Las ventajas en los procesos orgánicos son:

- La migración de la contaminación es generalmente más baja que en los procesos inorgánicos.
- Se requiere menos fijador que en los procesos inorgánicos.

- Los materiales tratados son de menor densidad, lo que reduce los costos de transportación.
- Los materiales orgánicos forman una frontera impermeable entre el residuo y la solución lixiviante.
- Los procesos pueden encapsular gran variedad de residuos.

Las desventajas de los procesos orgánicos son:

- El costo de los materiales es alto.
- En el encapsulamiento termoplástico y termoendurecimiento, hay un alto gasto de energía para el secado, fusión y polimerización.
- Algunos polímeros orgánicos son inflamables.
- Los procesos requieren labores técnicas y equipo costoso, excepto para el macroencapsulamiento.
- Los materiales son biodegradables y susceptibles de ser atacados por solventes orgánicos.
- Una incompleta polimerización de algunos de estos materiales podría causar contaminación.

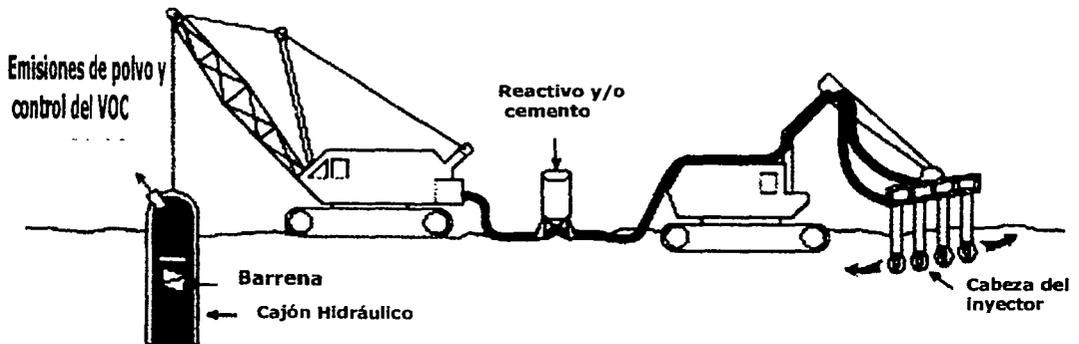


Fig. 4.4 Método de Estabilización y solidificación.

4.3.4 Vitrificación

El proceso de vitrificación utiliza corriente eléctrica para fundir el suelo contaminado, todos o residuos enterrados a temperatura altas (1600 a 2000 °C). La vitrificación inmoviliza la mayor parte de los compuestos inorgánicos y destruye los contaminantes orgánicos por pirólisis, y produce un material vítreo y cristalino de matriz sólida químicamente estable, resistente a la lixiviación y más durable que el granito o el mármol. El vapor de agua y los productos de la pirólisis son capturados en una trampa, la cual envía los

contaminantes a un sistema de tratamiento para gases que remueve las partículas y otros contaminantes del gas (ibídem).

El proceso consiste en insertar electrodos dentro del suelo a la profundidad que se desea tratar. Para iniciar el proceso, una mezcla conductora hecha de hojuelas de grafito y vidrio se coloca entre los electrodos para actuar como iniciador del circuito eléctrico, ya que el suelo a temperatura ambiente no tiene suficiente conductividad eléctrica para iniciarla. Posteriormente la corriente eléctrica pasa entre los electrodos para generar la fundición. Como la fusión crece hacia abajo y hacia fuera, los elementos no volátiles llegan a ser parte de la matriz fundida y los compuestos orgánicos se destruyen por pirólisis. Los subproductos de la pirólisis migran a la superficie de la zona vitrificada, donde ellos hacen combustión en presencia de aire. Los materiales inorgánicos se disuelven dentro o son encapsulados en la masa vitrificada. Las corrientes convectivas se dan en la fusión, mezclando los materiales presentes en el suelo. Cuando alcanza la profundidad y el volumen de fusión deseados, se suspende la corriente eléctrica y la masa tratada se enfría y solidifica. Los gases de la combustión se captan en una capucha que se coloca sobre el área afectada. La vitrificación tiene un límite de hasta 1000 ton de masa fundida y un máximo de ancho de 10 m. La aplicación de este proceso depende de las características del suelo. Si las pruebas de factibilidad indican mala conductancia o vitrificación del suelo, este se puede mejorar con la adición de arena, y ceniza de sosa (bicarbonato de sodio). Si el proceso se utiliza en la zona saturada del suelo, es necesario evaporar la humedad de este antes que se inicie su fundición, como se muestra en Fig. 4.5.

Los suelos con permeabilidad mayor de 10^{-4} cm/s son difíciles de vitrificar en presencia de aguas subterráneas y, en todo caso, se requiere desviarla temporalmente mientras se llevara a cabo el proceso.

Los electrodos son de molibdeno y grafito, y se instalan en el terreno con envolturas, que después de la instalación se remueven para un uso parcial posterior. La capucha sirve para sostener los conectores de los electrodos y para captar los gases, y se coloca en toda el área de aplicación. El flujo de aire a través de la capucha, se controla para mantener una presión negativa de 0.5 a 1 plg. en la columna de agua. El exceso de aire, gases y productos de combustión se conduce por un soplador de aire dentro del sistema de tratamiento. El volumen de gases de la fundición por vitrificación, representa menos del 1 % del volumen total de aire pasado a través del sistema de tratamiento de gases. El material peligroso que se puede emitir es escaso durante el proceso de fundición; después de que la solución es lavada, los filtros de partículas y el carbón activado pueden contener suficientes contaminantes para justificar su tratamiento o disposición final. El agua lavada puede ser pasadas a través de tierras diatomeas y carbón activado. Los filtros de partículas y el carbón activado pueden ser puestos en subsecuentes procesos de vitrificación para reprocesamiento. Como alternativa, el carbón

activado puede ser enviado fuera del sitio para tratamiento y reactivación del carbón (ibídem).

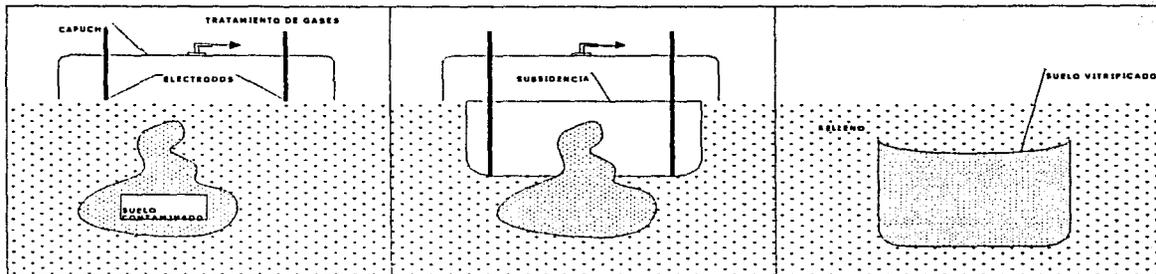
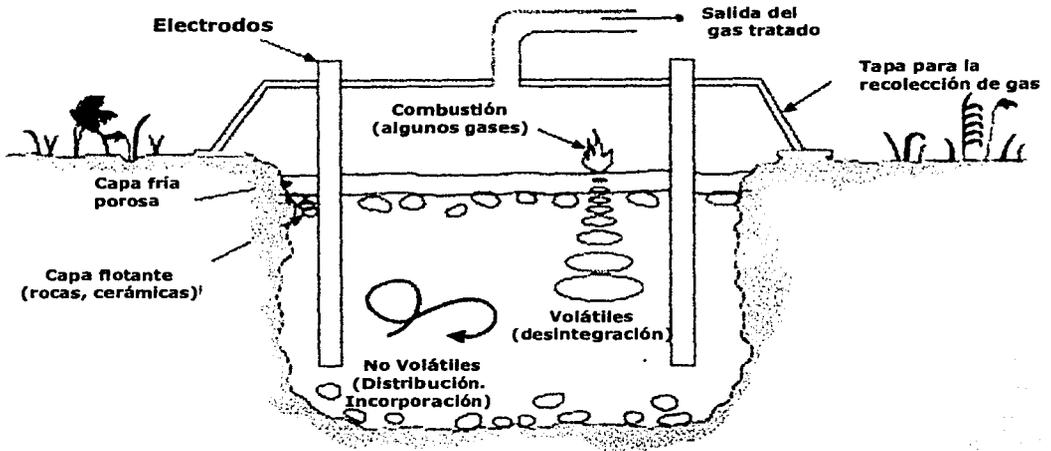


Fig. 4.5 Método de Vitrificación.

4.3.5 Barreras electrocinéticas

Esta técnica consiste en aplicar una corriente directa a través del suelo, entre dos o más electrodos. La corriente moviliza las especies cargadas, partículas e iones en el agua de poro, de acuerdo con el siguiente proceso:

- Electromigración (transporte de especies químicas cargadas bajo un gradiente eléctrico).
- Electrósmosis (transporte del fluido de los poros bajo un gradiente hidráulico).
- Electroforesis (movimiento de partículas cargadas bajo un gradiente hidráulico).
- Electrólisis (reacciones químicas asociadas con el campo eléctrico).
- Acidificación del suelo por el transporte del protón (H^+) generado por la electrólisis del agua en el ánodo.

Los componentes que contiene la masa acuosa del suelo se mueven hacia los electrodos respectivos en función de su carga eléctrica. Una vez en los electrodos, los contaminantes pueden ser bombeados mediante un pozo de extracción, o bien pueden quedar depositados en el propio electrodo.

Para incrementar la solubilidad y facilitar el movimiento de los contaminantes, se pueden inyectar agentes complejos y surfactantes. Se pueden utilizar para frenar el avance de lixiviados en rellenos sanitarios (ibídem).

En este proceso se genera un medio ácido en el ánodo y un medio alcalino en el cátodo. El pH baja alrededor de 2 en el ánodo y sube alrededor de 12 en el cátodo, dependiendo de la corriente total aplicada. El frente ácido avanza hacia el cátodo por diferentes mecanismos de transporte. Este avance del frente ácido puede disminuir debido a la capacidad de amortiguación del suelo, como se muestra en la figura 4.6.

4.3.6 Biorrestauración

Es el tratamiento de los contaminantes del subsuelo mediante la estimulación de la población microbiana nativa del lugar. Existen dos criterios fundamentales para que ocurra la biodegradación y la biorrestauración los cuales son, cuando la conductividad hidráulica debe ser tal que permita la transferencia de oxígeno y los nutrientes a través del acuífero. Por otro lado debe existir en el sitio el número adecuado de microorganismos para realizarse el proceso; el proceso de la biorrestauración se muestra en la Fig. 4.7

El proceso de biodegradación natural es una reacción bioquímica en que intervienen microorganismos nativos del sitio. Un compuesto orgánico es oxidado (pierde electrones) por un receptor de electrones que a la vez es reducido (gana electrones). Los principales receptores de electrones son: oxígeno, nitratos, sulfatos, dióxido de carbono.

La biorrestauración se define como el uso de microorganismos para remover la transformación de los residuos peligrosos a compuestos menos tóxicos y ambientalmente aceptables.

El objetivo final de los procesos de biorrestauración es proporcionar condiciones óptimas a las bacterias nativas para que metabolicen los contaminantes de interés de la manera más eficiente posible.

La biorrestauración puede ser limitada por ciertos factores: la disponibilidad de fuentes de carbono, el contenido de humedad, pH, temperatura, disponibilidad de nutrientes en el suelo y la presencia de especies microbianas.

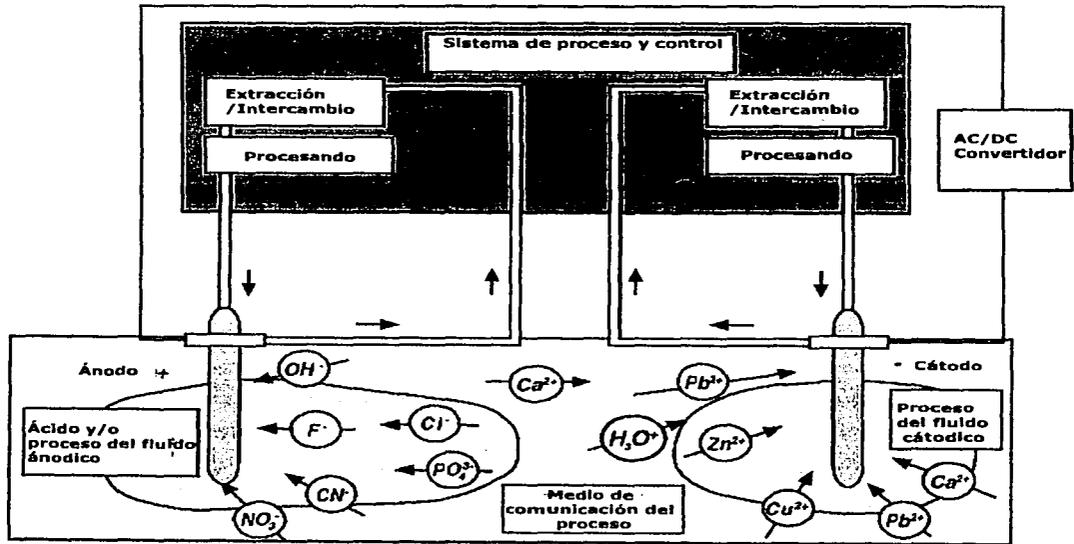


Fig. 4.6 Barreras electrocinéticas.

La ausencia de macronutrientes y micronutrientes puede limitar los procesos de biorrestauración. Los macronutrientes son elementos que las bacterias necesitan en cantidades relativamente grandes para llevar a cabo su metabolismo, y son principalmente carbono, nitrógeno y fósforo. Los micronutrientes son requeridos en pequeñas cantidades y son nitrógeno, fósforo y potasio.

Dentro del proceso de la biorrestauración existen tres tratamientos básicos que a continuación se mencionan:

4.3.6.1 Bioventeo

Es el término empleado para describir la combinación de tecnologías de extracción de vapor del suelo con la biorrestauración. La operación de los

sistemas de extracción de vapor del suelo, además de volatilizar VOC y SVOC, estimula las actividades aerobias de biodegradación en el suelo (ibídem).

El bioventeado presenta limitaciones físicas y químicas, como el grado de movimiento del aire a través del suelo, el cual está gobernado por la permeabilidad, grado de heterogeneidad y contenido de humedad del suelo. Por otro lado, las limitaciones químicas involucran el grado de contaminantes volátiles, su biodegradabilidad y solubilidad. Consiste en una aireación forzada que se va reduciendo en intensidad, ya que primero se busca una volatilización y después el incremento de la biodegradación.

4.3.6.2 Bioestimulación

La bioestimulación consiste en inyectar nutrientes y oxígeno disuelto al subsuelo para estimular el crecimiento y las actividades microbianas. Se requiere, se extrae agua para ser tratada o reciclada de la zona saturada e incrementar la humedad del suelo. La aplicación de este tratamiento depende de la permeabilidad, temperatura, disponibilidad de nutrientes y la presencia de población microbianas nativas en el suelo. Entre sus limitantes está la reducción de los porcentajes de biorrestauración debido a la temperatura del suelo, y el riesgo de migración de los contaminantes a las aguas subterráneas. Se aplica en suelos no saturados. El tiempo requerido de rehabilitación es de por lo menos seis años, y depende de la extensión de la contaminación.

4.3.6.3 Tratamiento de suelo (biolabranza in situ)

En esta técnica, el suelo es arado e irrigado para incrementar su aireación y optimar los niveles de humedad, y si es necesario, se completa con la adición de nutrientes inorgánicos. El sitio debe tener características que permitan prever la migración de los contaminantes a otros sitios. Dentro de estas características está la profundidad del nivel freático, distancias a zonas residenciales y clima. Se requiere sistemas de inyección, galerías filtrantes y rociadores para los sistemas de distribución de los nutrientes, así como extraer agua subterránea para su tratamiento, como se muestra en la figura 4.7.

Dentro de esta técnica existe la llamada pasiva que consiste en el mismo procedimiento descrito pero con la diferencia de que al suelo no se le agrega ningún tipo de nutriente para estimular la actividad de los microorganismos, solo se efectúa un monitoreo para analizar los niveles de biodegradación de contaminantes y la acción de las poblaciones microbianas nativas.

Las ventajas de la biorrestauración son:

- Bajos costos de instalación.
- No requiere excavaciones ni transportación del suelo.
- Puede utilizarse en la rehabilitación de grandes extensiones de suelo.

sistemas de extracción de vapor del suelo, además de volatilizar VOC y SVOC, estimula las actividades aerobias de biodegradación en el suelo (ibídem).

El bioventeo presenta limitaciones físicas y químicas, como el grado de movimiento del aire a través del suelo, el cual está gobernado por la permeabilidad, grado de heterogeneidad y contenido de humedad del suelo. Por otro lado, las limitaciones químicas involucran el grado de contaminantes volátiles, su biodegradabilidad y solubilidad. Consiste en una aireación forzada que se va reduciendo en intensidad, ya que primero se busca una volatilización y después el incremento de la biodegradación.

4.3.6.2 Bioestimulación

La bioestimulación consiste en inyectar nutrientes y oxígeno disuelto al subsuelo para estimular el crecimiento y las actividades microbianas. Se requiere, se extrae agua para ser tratada o reciclada de la zona saturada e incrementar la humedad del suelo. La aplicación de este tratamiento depende de la permeabilidad, temperatura, disponibilidad de nutrientes y la presencia de población microbianas nativas en el suelo. Entre sus limitantes está la reducción de los porcentajes de biorrestauración debido a la temperatura del suelo, y el riesgo de migración de los contaminantes a las aguas subterráneas. Se aplica en suelos no saturados. El tiempo requerido de rehabilitación es de por lo menos seis años, y depende de la extensión de la contaminación.

4.3.6.3 Tratamiento de suelo (biolabranza in situ)

En esta técnica, el suelo es arado e irrigado para incrementar su aireación y optimar los niveles de humedad, y si es necesario, se completa con la adición de nutrientes inorgánicos. El sitio debe tener características que permitan prever la migración de los contaminantes a otros sitios. Dentro de estas características está la profundidad del nivel freático, distancias a zonas residenciales y clima. Se requiere sistemas de inyección, galerías filtrantes y rociadores para los sistemas de distribución de los nutrientes, así como extraer agua subterránea para su tratamiento, como se muestra en la figura 4.7.

Dentro de esta técnica existe la llamada pasiva que consiste en el mismo procedimiento descrito pero con la diferencia de que al suelo no se le agrega ningún tipo de nutriente para estimular la actividad de los microorganismos, solo se efectúa un monitoreo para analizar los niveles de biodegradación de contaminantes y la acción de las poblaciones microbianas nativas.

Las ventajas de la biorrestauración son:

- Bajos costos de instalación.
- No requiere excavaciones ni transportación del suelo.
- Puede utilizarse en la rehabilitación de grandes extensiones de suelo.

Las desventajas de la biorrestauración son:

- Dificultad para monitorear y cuantificar la extensión o grado de biorrestauración
- Se pueden producir productos de la biodegradación, los cuales permanecen en el suelo.
- El periodo de operación puede ser largo, dependiendo del tipo de contaminante y las condiciones ambientales.

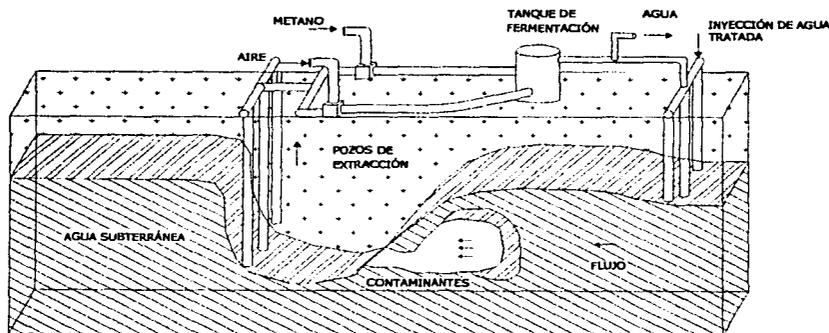


Fig. 4.7 Método de Biorrestauración.

4.4 TÉCNICAS DE TRATAMIENTO EX SITU

Las técnicas ex situ necesitan menos tiempo, son más sencillas de controlar y se aplica a una gama más amplia de contaminantes, pero se requiere la excavación previa del suelo.

Las técnicas principales son:

4.4.1 Lavado de suelo con surfactantes (soil washing)

El lavado del suelo (SW) y la extracción química (CHEX) son procesos mecánicos de reducción de volumen y remoción de contaminantes. La extracción y el lavado del suelo fuera del sitio se han desarrollado a lo largo de tres líneas principales:

1. Fraccionamiento del tamaño de partícula.
2. Formación de sistemas acuosos, usando algunos métodos mecánicos o químicos para remover y concentrar los contaminantes.
3. Decantación común empleando solventes para contaminantes orgánicos y ácidos, y bases o agentes quelantes para contaminantes inorgánicos.

El proceso de lavado de suelo reduce el volumen por tratar en 90 %, lo cual significa que solo el 10 % del volumen original necesita tratamiento. Sin embargo, existen sistemas en los que alcanza hasta 95 % de reducción del volumen original. Si los residuos tienen un alto porcentaje de limo fino y arcilla, una mayor parte del material deberá ser sometida a otro tratamiento subsiguiente más costoso.

El lavado del suelo es comúnmente utilizado en combinación con las tecnologías de biorrestauración, incineración y solidificación/estabilización. El tiempo promedio de una operación de limpieza de 28 000 ton deberá ser menor de tres meses.

Los factores más importantes por considerar son: el tipo de contaminante, la concentración y la solubilidad en el agente de extracción, la cinética química del solvente, las características de sorción del contaminante, la granulometría del material, el tipo de suelo, su contenido de humedad y su contenido orgánico (ibídem).

Esta técnica es eficiente para tratar lodos residuales y tierra que contiene principalmente contaminantes orgánicos. Las eficiencias de remoción dependen del tipo de contaminante, así como del tipo de suelo. Los VOC son más fáciles de remover con esta técnica; estos compuestos pueden removerse con un porcentaje de eficiencia de 90 a 99%. Los compuestos semivolátiles pueden ser removidos entre 40 y 90 %, dependiendo de la selección del surfactante apropiado. Los tiempos de operación varían en función de la cantidad y concentración de los contaminantes, así como del tipo de suelo.

Las ventajas de esta tecnología son:

- Ofrece un sistema cerrado que minimiza la emisión de contaminantes a la atmósfera y la posibilidad de contaminar otros sitios.
- Crear un sistema inafectable por condiciones externas. Este sistema permite controlar las condiciones como pH y temperatura, en las cuales se tratan las partículas de suelo.
- Permite excavar los residuos peligrosos y tratarlos en el lugar.
- Existen unidades móviles que minimizan el riesgo de expandir la contaminación cuando el material se transporta hasta un sitio de tratamiento.
- Es de bajo costo para la minimización del volumen de suelos contaminados.

- Es posible pretratar suelos para biorrestaurarlos después.
- Se logran altos niveles de limpieza de algunos contaminantes en una gran variedad de suelos.

Las desventajas de esta tecnología son:

- La presencia de plomo y otros contaminantes inorgánicos podrían interferir en la extracción de materiales orgánicos.
- La aplicación puede implicar complejas consideraciones técnicas; por ejemplo algunos sistemas utilizan butano y propano comprimido, que exigen un manejo estricto para evitar que se volatilicen y se incendien.
- Podría ser necesario un tratamiento preliminar extenso de los residuos para eliminar o desmenuzar los terrenos grandes.
- Los contaminantes no se destruyen.
- Las partículas finas (pasta de limo y arcilla) y los fluidos de lavado requieren un tratamiento secundario para poder alcanzar los niveles permisibles para almacenarlos en rellenos sanitarios o descargarlos.
- Las mezclas complejas de residuos hacen difíciles la formulación del fluido de lavado (ibídem).

4.4.2 Desorción térmica

En la desorción térmica se calienta el suelo contaminado a una temperatura que oscila entre 90 y 540 °C, para conseguir así que los contaminantes que posean un punto de ebullición bajo, pasen a fase de vapor. De esta forma se consigue separarlos para tratarlos adecuadamente (Seoáñez,1999).

No se debe confundir la desorción térmica con la incineración.

La incineración es otro sistema de tratamiento ex situ, donde se destruye el contaminante en cámaras de combustión a altas temperatura (800 a 1200 °C).

En la desorción térmica, al contrario; el calor no se utiliza para destruir, sino para separa físicamente los contaminantes.

En estos procesos, los dispositivos de desorción giratorios, de calentamiento directo o indirecto, producen la vaporización de los contaminantes, y una corriente de aire los lleva a un mecanismo de tratamiento de gases, como pueden ser filtros de carbón activo, condensadores o quemadores auxiliares.

La eficiencia de este método se comprueba comparando la concentración de contaminantes en el suelo tratado con la que contiene el suelo contaminado sin tratar. Si existen otros contaminantes no volátiles, el suelo resultante ha de ser sometido a tratamientos complementarios.

Este método se puede aplicar a suelos contaminados por alquitranes, residuos de refinería, desechos de tratamiento de madera, esmaltes, plaguicidas, combustibles, bifenilos policlorados y solventes en general (ibídem).

Son factores limitantes a la hora de aplicar la desorción térmica:

- Suelos con alto porcentaje en humedad, pues debido a la presencia de agua, se necesita más calor adicional para vaporizar los contaminantes.
- Suelos con alto contenido en limos y arcillas, pues estas partículas, cuando se calientan, generan mucho polvo.

4.4.3 Extracción con solventes

Un solvente es un líquido que tiene la capacidad de disolver otra sustancia.

La extracción de contaminantes con solventes no destruye aquellos, sino que los separa y los concentra, para que posteriormente puedan ser tratados con otra técnica (ibídem).

Las sustancias que se utilizan como solventes son: Dióxido de carbono líquido, acetona, metanol, éter dimetílico, propano, butano y hexano.

Este sistema es eficaz para tratar fangos residuales, suelos y sedimentos que contengan: derivados del petróleo, bifenilos policlorados, productos halogenados (Br, I y Cl), compuestos orgánicos volátiles.

En ningún caso la extracción de contaminantes orgánicos por solventes reduce la toxicidad de estos, pero sí tiene la ventaja de separarlos de los fangos y suelos contaminados.

En este proceso, se produce la mezcla solvente - fango, formándose tres fracciones distintas en el extracto: agua, sólidos y solvente con contaminantes en disolución. Después de la mezcla, cada fracción puede ser tratada de forma individual.

Los contaminantes inorgánicos, como muchos ácidos, bases, sales o metales pesados, no son apropiados para ser tratados por este método.

4.4.4 Deshalogenación química

Consiste en retirar los halógenos de un contaminante para disminuir su peligrosidad. Se aplica para suelos contaminados por compuestos aromáticos halogenados y dioxinas (ibídem).

Las sustancias contaminantes que contienen halógenos tienen procedencias muy diversas, entre las que se encuentran: plaguicidas, productos textiles, transformadores eléctricos de alta tensión, tuberías de plástico.

Existen dos tipos de deshalogenación química, los cuales son:

4.4.4.1 Deshalogenación con glicolatos

El tipo de reactivo utilizado es el APEG (hidróxido de sodio con glicol polietilénico de potasio).

El proceso de tratamiento es el siguiente: se mezcla el suelo contaminado con el APEG y se calienta en un reactor. El halógeno del contaminante reacciona con el hidróxido alcalino, formando una sal. El glicol polietilénico sustituye al halógeno en la molécula de bifenilo policlorado, disminuyendo así su peligrosidad. Las sustancias resultantes son una sal no tóxica y un compuesto parcialmente deshalogenado, menos tóxico. Después del calentamiento en el reactor, el suelo debe ser sometido a diversos tratamientos para separa el reactivo APEG y el agua (ibídem).

4.4.4.2 Descomposición catalizada por bases (Es una técnica diseñada por la EPA.)

Tiene la ventaja que no causa contaminación, y es válida para aplicarla a fangos residuales, a líquidos y a tierras y sedimentos contaminados con compuestos orgánicos clorados, como bifenilos policlorados, dioxinas y plaguicidas.

El procedimiento a seguir en este caso, es excavar y llevar las tierras contaminadas a una planta de cribado, para eliminar residuos y partículas de gran tamaño. El suelo resultante se tritura y se mezcla con bicarbonato sódico. Se introduce la mezcla en un reactor y se calienta a una temperatura que oscila entre 310 y 430 °C.

A causa del calor, los halógenos se separan del suelo en fase de vapor. Los vapores que se obtiene, se condensan y se mezclan con hidróxido sódico (base). A continuación se calienta la mezcla en un reactor de fase líquida y se produce la reacción de deshalogenación. El producto resultante se puede iniciar o reciclar (ibídem).

4.4.5 Biorrestauración

En el proceso de biorrestauración ex situ, se extrae por excavación los suelos contaminados para proceder a su tratamiento en superficie; existen dos tratamientos para el suelo contaminado los cuales son:

4.4.5.1 Biorrestauración en fase de lechada

Se utiliza un biorreactor, en el que el suelo contaminado se mezcla con agua y otros aditivos (nutrientes y oxígeno).

Las condiciones en el biorreactor se controlan en todo momento, para que los organismos puedan degradar los contaminantes sin interrupción.

Cuando termina el tratamiento se separa el agua de las fracciones sólidas. Si quedarán vestigios de contaminación, se volvería a repetir el proceso.

Esta medida tiene la ventaja de ser rápida en comparación con otros tratamientos, y están especialmente indicadas para suelos contaminados de naturaleza arcillosa (ibídem).

4.4.5.2 Biorrestauración en fase sólida

Se excava el suelo contaminado y se somete la tierra extraída a un tratamiento en superficie, que deberá disponer de un sistema de control para evitar la migración de lixiviados. Estas medidas pueden ser:

4.4.5.2.1 Tratamiento del suelo

El suelo contaminado se extiende en una losa, con un circuito incorporado de recogida de lixiviados. El suelo se voltea periódicamente para facilitar la mezcla del aire con los contaminantes. Durante este proceso se deben controlar la temperatura, la concentración de O₂ y los nutrientes.

4.4.5.2.2 Biopilas

Una biopila se construye por medio de la dispersión del suelo contaminado sobre una superficie conocida como lecho o cama de tratamiento. El agua que contiene los nutrientes disueltos se hace pasar a través de la pila de suelo para estimular la biodegradación de los contaminantes (Iturbe,1998). Existen dos tipos de biopilas:

- El oxígeno y los nutrientes se suministran a través de la aspersión del agua sobre la pila de suelo, el agua se aplica por medio de un sistema de irrigación y el lecho es equipado con un sistema de drenaje colector. El líquido que lixivia a través de la pila es recolectado y tratado en un bioreactor de fase líquida para posteriormente reciclarlo a través de la pila de suelo.
- Los nutrientes se mezclan con el suelo cuando se construye la pila. El aire se suministra por medio de tuberías colocadas en el fondo y en la parte media de la pila.

Las ventajas que ofrece esta técnica son:

- Los contaminantes realmente son transformados y algunos completamente mineralizados.

- Se utilizan microorganismos cuyo hábitat natural es el suelo, sin introducir compuestos potencialmente peligrosos.
- Es una tecnología segura y económica.
- Las bacterias mueren cuando los nutrientes se agotan.
- El suelo puede ser reutilizado.

Las desventajas que ofrece esta técnica son:

- Los microorganismos pueden inhibirse por la presencia de compuestos tóxicos.
- No tiene éxito en suelos de baja permeabilidad.
- Algunos aditivos pueden tener efecto adverso.
- Requiere largos periodos de operación.

En la figura 4.8 se muestra está técnica.

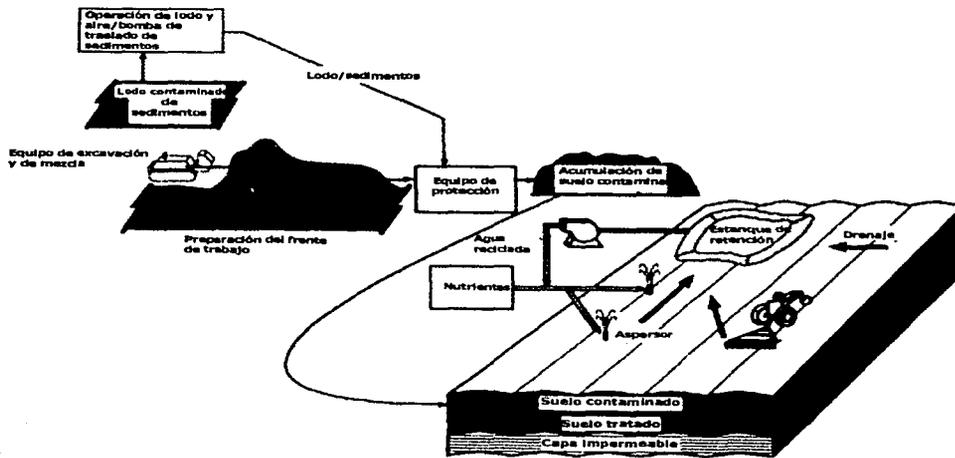


Fig. 4.8 Método de biorrestauración(Biopilas).

CAPÍTULO V

***CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES***

En éste capítulo se presentan las principales conclusiones a las que se llegó al término del trabajo. Así mismo, se presentan algunas recomendaciones que se consideran importantes para enriquecer la práctica profesional y la difusión del conocimiento de la contaminación del suelo por lixiviados provenientes de sitios de disposición final de residuos sólidos municipales.

El objetivo principal de éste trabajo es describir el problema de contaminación del suelo por lixiviados, así como analizar y proponer soluciones para el control de dicha contaminación. Con las conclusiones y recomendaciones siguientes se espera haber cumplido éste objetivo.

5.1 CONCLUSIONES

- A través de la historia en México la población se ha preocupado por atacar el problema de los residuos sólidos, contemplando que es un foco de contaminación al ambiente.
- Como consecuencia del aumento de población en el país, se ha incrementado la generación de los residuos sólidos, así como de los sitios de disposición final, siendo algunos no controlados.
- En la actualidad se tiene más conciencia de la diversidad de residuos que se generan, ya sea por su peligrosidad, su origen, sus características químicas y físicas; tomando en cuenta lo anterior se puede disponer de ellos de una forma más segura y un grado de afectación menor al ambiente.
- El conocer el ciclo de los residuos sólidos municipales ayuda para saber que existen varias etapas que pueden hacer cambiar las propiedades físicas de éstos, así como para saber cuales son peligrosos y cuales no, para que al disponerlos en sitios determinados cumplan con los requisitos mínimos, evitando la afectación al ambiente y a los seres vivos.
- Existen diversos métodos de disposición final de residuos municipales entre los que se encuentran el relleno sanitario, el cual es un método que tiene una capacidad grande para contener residuos sólidos y al final de su vida útil, éste pueda ser utilizado como áreas verdes, ayudando a mejorar el ambiente.
- Al utilizar los métodos de disposición final (relleno sanitario o a "cielo abierto"), no se tiene control de los factores climatológicos en especial la precipitación, que junto con la descomposición de los residuos sólidos municipales, se generan los lixiviados y el biogas, afectando el aire, agua y suelo.
- La afectación de los contaminantes al suelo se debe principalmente a las propiedades físicas, químicas y biológicas de éste, así como a la movilidad, degradabilidad, toxicidad, etc., del contaminante.
- Al conocer los aspectos básicos de los rellenos sanitarios (diseño, construcción, operación y mantenimiento), es posible controlar y monitorear los contaminantes (lixiviados y biogas) que se generan en éstos, evitando así afectaciones al ambiente y a la salud humana.

- Con la normatividad que se tiene relativa a los rellenos sanitarios, se cuenta con parámetros para el buen funcionamiento de éste, evitando que el medio (aire, agua y suelo) se contamine.
- Al conocer las características de los suelos, así como sus propiedades físicas, químicas y edafológicas, se puede saber cuál es el suelo más factible para la construcción del relleno sanitario; así como la permeabilidad del mismo; ésto ayuda a saber la movilidad de los contaminantes en el suelo, su tiempo de filtración y de rehabilitación de los suelos.
- Dentro del marco legislativo para la contaminación de los suelos existen leyes (LGGEPA, Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos), pero en ninguna se encontró que se hablara de los lixiviados en particular, ni de sanciones por contaminar los suelos.
- Existen procesos naturales que afectan el traslado de sustancias contaminantes, retardando o aumentando su movilidad, él conocerlos da una ventaja, ya que se pueden utilizar para tratar de detener el contaminante aplicando alguna técnica de rehabilitación adecuada al grado de contaminación de los suelos.
- Al calcular la cantidad de lixiviados que se generan en un relleno sanitario, se puede saber que tan contaminado está el suelo y si es posible su rehabilitación, así como la afectación al medio ambiente.
- Los efectos inmediatos por la contaminación del suelo por lixiviados son la contaminación del agua subterránea y a su vez la repercusión en la salud humana (diferentes tipos de cáncer) al consumirla o al entrar en contacto con los suelos contaminados, de éstos últimos, se ve afectada la vida que depende de ellos.
- En México se le ha dado poca importancia a la contaminación de suelos, por lo cual existe una escasa experiencia en el diagnóstico y saneamiento de los mismos, tampoco hay una normatividad que indique criterios para definir los niveles de limpieza.
- De acuerdo al grado de contaminación del suelo y la forma en que se transporta el contaminante, se puede determinar qué tipo de técnica se utilizará, ya sea la de confinamiento, in situ o ex situ.
- La aplicación de tecnologías de saneamiento es muy elevado, y es más costoso limpiar que controlar la contaminación o evitarla.
- En México existe poca información disponible acerca de las actividades de evaluación de la contaminación de suelos, ni datos que revelen trabajos de rehabilitación, la información que se conoce es por que sé a aplicado estas técnicas en otros países.

5.2 RECOMENDACIONES

Con base en las conclusiones presentadas, enseguida se propone las siguientes recomendaciones con el fin de ampliar el conocimiento y la práctica profesional de la restauración de suelos por lixiviados.

5.2.1 Técnicas

- Revisar la normatividad sobre contaminación de los suelos, ya que las que se encuentran no existen parámetros que contemplen qué suelos se denominan como contaminados, su grado de contaminación, cuales pueden rehabilitarse y cuales no, así como parámetros de limpieza para el saneamiento de los mismos.
- Siempre existe un cierto grado de filtración en la base (arcilla o membrana flexible) del relleno, ya sea por el coeficiente de permeabilidad del material o el deterioro del mismo, por lo cual se debe tomar en cuenta para el control de los lixiviados.

5.2.2 Académicos

- Continuar con la investigación respecto al tema de este trabajo, ya que existe muy poca información al respecto; conocer más aspectos sobre la contaminación de los suelos por lixiviados ayudará a evitar la contaminación ambiental y la afectación de la salud humana.
- Abrir líneas de investigación sobre este tema específico ya que la mayoría de la información que se encuentra se refiere a residuos peligrosos, dándole poca importancia a los residuos sólidos municipales.
- Introducir dentro del plan de estudios de la licenciatura temas o materias que se enfoquen a tratar este tema, ya que se conoce muy poco al respecto.
- Hacer un enfoque económico sobre la restauración de los suelos ya que en México no se tiene noticia alguna de que se hagan trabajos de éstos, todo lo que se encuentra es de otros países.

5.2.3 Profesionales

- Dar un enfoque mayor dentro de la ingeniería civil a los aspectos ambientales y en particular con respecto a los suelos, ya que cuando se tiene un proyecto a realizar, generalmente se pide un estudio de mecánica de suelos, pero nunca se contempla si éste está contaminado o no, siendo un riesgo ambiental, económico y social, tanto para los que laboran en obra, como para los que van a habitar dichas construcciones. Por lo que se debe contemplar todos los aspectos al tener un proyecto en nuestras manos para poder controlar cualquier detalle que presente.
- Tomar en cuenta que cualquier obra afecta al medio ambiente, ya sea edificios, presas, líneas de metro, etc., no es necesario que tenga que ver con obras como los rellenos sanitarios para pensar que se afecta al medio ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

- Andrade Gebbert Guillermo, (1988). **Aspectos generales sobre clasificación, uso, manejo y evaluación edafológica.** PEMEX
- Bagchi Amalendu (1994). **Desing, construction, and monitoring of landfills.** John Wiley and sons, inc. Nueva York, E.U.
- Calvo Lugo Cesar Mauricio (1995). **Aplicación del método de diferencias finitas para la modelación de flujo de biogas en rellenos sanitarios.** (Tesis),UNAM, México.
- Deffis Caso Armando (1989), **La basura es la solución.** Editorial Concepto S.A D.F., México
- Doménech Xavier (1993). **Química ambiental. El impacto ambiental.** Miraguano, Madrid, España.
- Doménech Xavier (1995). **Química del suelo. El impacto de los contaminantes.** Miraguano, Madrid, España.
- Enkelin C. Ernesto, Cano Geronimo, Garza Raúl A, Vogel Enrique, (1997). **Ciencias ambientales y desarrollo sostenible.** Thomson editores, México.
- García Romero Alicia (2000). **Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios por métodos físicos – químicos.** (Tesis),UNAM DEPFI, México.
- Iturbe Argüelles Rosario, Castro Rodríguez Alejandrina, Madrigal Monamez Ismael (1998). **Técnicas de rehabilitación de suelos y acuíferos.** Instituto de Ingeniería No. 612. México.
- Juárez Badillo. E, Rico Rodríguez A, (2000). **Fundamentos de la mecánica de suelos.** Tomo I. Limusa, México.
- LaGrega Michael D., Buckingham Philips L., Evans Jeffrey C. (1996). **Gestión de residuos tóxicos. Tratamiento, eliminación y recuperación de suelo.** Mc. Graw-Hill. Madrid, España.
- Legorreta Cuevas Hector A. (1998). **Apuntes de comportamiento de suelos.** UNAM, México.
- Loaiza Sánchez Adalberto Efraín (1996). **Diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios municipales.** (Tesis),UNAM DEPFI, México.
- Nebel Bernard J., Wright Richard (1999). **Ciencias ambientales ecología y desarrollo sostenible.** Pearson, México.

- Andrade Gebbert Guillermo, (1988). **Aspectos generales sobre clasificación, uso, manejo y evaluación edafológica.** PEMEX
- Bagchi Amalendu (1994). **Desing, construction, and monitoring of landfills.** John Wiley and sons, inc. Nueva York, E.U.
- Calvo Lugo Cesar Mauricio (1995). **Aplicación del método de diferencias finitas para la modelación de flujo de biogas en rellenos sanitarios.** (Tesis),UNAM, México.
- Deffis Caso Armando (1989), **La basura es la solución.** Editorial Concepto S.A D.F., México
- Doménech Xavier (1993). **Química ambiental. El impacto ambiental.** Miraguano, Madrid, España.
- Doménech Xavier (1995). **Química del suelo. El impacto de los contaminantes.** Miraguano, Madrid, España.
- Enkelin C. Ernesto, Cano Geronimo, Garza Raúl A, Vogel Enrique, (1997). **Ciencias ambientales y desarrollo sostenible.** Thomson editores, México.
- García Romero Alicia (2000). **Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios por métodos físicos – químicos.** (Tesis),UNAM DEPFI, México.
- Iturbe Argüelles Rosario, Castro Rodríguez Alejandrina, Madrigal Monamez Ismael (1998). **Técnicas de rehabilitación de suelos y acuíferos.** Instituto de Ingeniería No. 612. México.
- Juárez Badillo. E, Rico Rodríguez A, (2000). **Fundamentos de la mecánica de suelos.** Tomo I. Limusa, México.
- LaGrega Michael D., Buckingham Philips L., Evans Jeffrey C. (1996). **Gestión de residuos tóxicos. Tratamiento, eliminación y recuperación de suelo.** Mc. Graw-Hill. Madrid, España.
- Legorreta Cuevas Hector A. (1998). **Apuntes de comportamiento de suelos.** UNAM, México.
- Loaiza Sánchez Adalberto Efraín (1996). **Diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios municipales.** (Tesis),UNAM DEPFI, México.
- Nebel Bernard J., Wright Richard (1999). **Ciencias ambientales ecología y desarrollo sostenible.** Pearson, México.

- Noreña Franco Paula (1990). **Evaluación de la incidencia de metales pesados por depósitos de chatarra en el suelo.** (Tesis),UAM, México.
- Ortíz Villanueva Bonifacio(1990).**Edafología.** Universidad Autónoma de Chapingo. Departamento de suelos.
- Ramiro Salas Fernando (2001). **Generación, control y tratamiento de biogas y lixiviados de un relleno sanitario.** (Tesis),UNAM, México.
- Roldán Martín Gladys Adriana (2001).**Biopilas como alternativa de tratamiento para la rehabilitación de suelos contaminados con hidrocarburos.** (tesis), UNAM DEPFI, México.
- Sancho y Cervera Jaime. **Manual para la operación de rellenos sanitarios.** Secretaria de Desarrollo Social. SEDESOL.
- Seoáñez Calvo Mariano (1999).**Contaminación de suelos. estudio, tratamiento y gestión.** Mundi - prensa, Madrid, España.
- Tchobanoglous George, Theisen Halary, Eliassen Rolf (1994). **Gestión Integral de residuos sólidos.** Mc. Graw Hill
- Trejo Vázquez Rodolfo (1999). **Procesamiento de la basura urbana.** Trillas, México.
- INEGI, (1999) **Estadística del Medio Ambiente del Distrito Federal y Zona Metropolitana.**
- INEGI,(1991). **Edafología de México.**
- Ley General Del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.(LGEEPA). Título Cuarto Protección Al Ambiente. **Capítulo IV. Prevención y Control De La Contaminación Del Suelo.** (Publicada en el D.O.F. de fecha 28 de Enero de 1988)
- Norma oficial mexicana **NOM-083-ECOL-1996**, que establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a la disposición final de los residuos sólidos municipales.(Publicada en el D.O.F. de fecha 25 de noviembre de 1996)
- 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. (Publicada en el D.O.F. de fecha 22 DE Junio de 1994)

- **AMCRESPAC. Residuos sólidos y peligrosos. Su disposición inadecuada y efectos contaminantes sobre suelos y subsuelos.** Internet home page. [http:// www.amcrespac.org.mx/articulo3.htm](http://www.amcrespac.org.mx/articulo3.htm)
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. CEPIS (1988). **Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas: una metodología basada en datos existentes.** Internet home page. [http:// www.cepis.ops-oms.org/eswww/fulltext/repind46/riego/riego/html](http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/fulltext/repind46/riego/riego/html)
- **Contaminación del agua.** Internet home page. <http://www.aprintel.com/verano01/ecologia/lectura6m3.htm>
- **Contaminación del suelos e impacto ambiental.** Internet home page. <http://www.edafologia.ugr.es/Conta/Tema11/1Concepto.html>
- Instituto Nacional de Ecología (INE). **El manejo actual de los residuos: condicionantes y consecuencias.** Internet home page. http://www.ine.gob.mx/upsec/programas/prog_rip/cap-2.htm
- La ciencia ecológica. **Clasificación de los suelos.** Internet home page. http://members.es.tripod.de/ecoweb/cienc_suelo_clasific.htm
- La ciencia ecológica. **El suelo: formación, composición.** Internet home page. http://members.es.tripod.de/ecoweb/cienc_suelo_formac.htm
- La ciencia ecológica. **Textura y estructura de los suelos.** Internet home page. http://members.es.tripod.de/ecoweb/cienc_suelo_textura.htm
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (1996a) **Tecnologías de rehabilitación de suelos.** Internet home page. <http://www.clu-in.org/techdrcf.cfm>
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Internet home page. <http://www.epa.gov>
- **Vertederos.** Internet home page. http://www.greenpeace.es/toxico/toxi_10.htm